



Universidad Veracruzana



CIENCIAS APLICADAS 2024

Compiladores:

Cutberto Romero Meléndez.

Francisco Montaña Cuahuilaz.

Salvador Vazquez Moctezuma.

**Universidad Veracruzana
USBI**

**Universidad Autónoma Metropolitana
AZCAPOTZALCO**

**Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM**

CIENCIAS APLICADA 2024

Cutberto Romero Meléndez. Universidad Autónoma Metropolitana,
Azcapotzalco.

Francisco Montaña Cuahuilaz. Universidad Nacional Autónoma de México.

Manuel Barrientos Morales. Universidad Veracruzana,
USBI.

Universidad Veracruzana

Dr. Martin Gerardo Aguilar Sánchez

Rector

Dr. Juan Ortiz Escamilla

Secretario Académica

Mtra. Lizeth Margarita Viveros Cancino

Secretaria de Administración y Finanzas

Dra. Jaqueline el Carmen Jongitud Zamora

Secretaria de Desarrollo Institucional

Dr. Rubén Edel Navarro

Vicerrector de la Región Veracruz-Boca del Rio

Dr. Arturo Serrano Solís

Director General del Área Académica de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

Dr. Jorge Genaro Vicente Martínez

Director de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia

Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco

Av. San Pablo 420

Col. Nueva el Rosario

Alcaldía Azcapotzalco

C.P. 02128

CDMX.

Rector General

Dr. José Antonio De los Reyes Heredia

Secretaria General

Dra. Norma Rondero López.

Rectora de UAM Azcapotzalco

Dra. Yadira Zavala Osorio

Director de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Dr. Rafael Escarela Pérez

Secretaria Académica de Ciencias Básicas e Ingeniería

Dra. Maricela Claudia Bravo Contreras

Jefe del Departamento de Ciencias Básicas

Dr. Ricardo Teodoro Páez Hernández

Universidad Nacional Autónoma de México

" Por mi raza hablará el espíritu"

C.P. 04510

Ciudad Universitaria.

Universidad Nacional Autónoma de México. " Por mi raza hablará el espíritu" .

Dr. José Leonardo Lomelí Venegas

Rector

Dra. Patricia Dávila Aranda

Secretario general

Dr. Fernando Castañeda Sabido

Director General de Asuntos de Personal Académico

© **Universidad Autónoma Metropolitana**

Unidad Azcapotzalco

Universidad Nacional Autónoma de México

Cutberto Romero Meléndez.

Francisco Montaña Cuahuilaz

Salvador Vazquez Moctezuma.

CIENCIAS APLICADAS 2024

México 2024

Comité Organizador

Dr. Cutberto Romero Meléndez. Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco México.

Mtro. Francisco Montaña Cuahuilaz. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dra. María de Lourdes Juárez Mosqueda. Facultad De Medicina Veterinaria Y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México

Mtra. en I. Rafaela Gutiérrez Lara. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. David Parra Guevara. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.

Comité Organizador Local

Dr Manuel Barrientos Morales. Laboratorio de Biología de la Reproducción.

mbarrientos@uv.mx

Dra Patricia Cervantes Acosta

pcervantes@uv.mx

Dra Luz Teresa Espín Iturbe

lespin@uv.mx

Maria Luisa Méndez Ojeda

lmendez@uv.mx

Dr Belisario Domínguez Mancera

beldominguez@uv.mx

Dr Antonio Hernández Beltran

anhernandez@uv.mx

Dr Vicente Eliezer Vega Murillo

vvega@uv.mx

Dr Alfredo Villagómez Cortés

avillagomez@uv.mx

Dr Pedro Javier Garcia

jagarcia@uv.mx

Dra Angélica Olivares Muñoz

aolivares@uv.mx

Comité Científico

Dra. Ingrid Garcés Millas, Universidad de Antofagasta, Chile.

Dra. Olivia Zamora Martínez, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dra. Adela Margarita Reyes Salas, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dra. Alejandra Mendoza Campos, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dra. Luz María Lazcano Arriola, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dra. Sandra Loera Serna, Departamento de Ciencias Básicas, UAM-A

Dr. Martin Alberto Díaz Viera, Instituto Mexicano del Petróleo.

Dr. Mario Ricardo Israel Rodríguez Varela, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dr. Ernesto Hernández Mendiola, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México

Prof. Dr. Yuri N. Skiba, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dr. Daniel Peña Maciel, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dr. Asur Guadarrama Santana, Instituto de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico. UNAM.

Dr. Salvado Vázquez Moctezuma, Instituto de Investigaciones Bibliotecológicas y de la información, UNAM.

Dr. Miguel Ángel Cornejo Cortés, FES-C Cuautitlan, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mtro. José Manuel Montaña Hilario, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mtra. Fernández Cata Geyser, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mtro. Jesús Aceves Romero, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mtro. Arturo Medina Cabrera, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Quím. María Patricia Girón García, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

M. en C. Ericka Gabriela García Contreras, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

M. en I. Eduardo Bernal Vargas, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México.

M. en I. Mario Alberto Díaz Cruz, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

M. en I. Rafaela Gutiérrez Lara, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mtro. Daniel Martínez Gutiérrez, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

M. en A. Alejandro Silva, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mtro. Lauro Santiago Cruz, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Introducción.

La investigación aplicada tiene un carácter estratégico fundamental en el desarrollo tecnológico de nuestra sociedad y en el establecimiento de una cultura innovadora que permita la competencia basada en el conocimiento.

En nuestros días la Ciencia aplicada ha cobrado gran relevancia frente a diversos problemas actuales que se han agudizado en estos últimos años, como el desajuste climático, la aparición de nuevos virus letales, la crisis educativa nacional derivada de la pandemia, la creciente contaminación ambiental o la alarmante escasez mundial de agua. Se hace más patente la urgencia de participar, desde nuestros laboratorios, aulas y centros universitarios, en las propuestas de solución a problemas relacionados con esos problemas de nuestro tiempo. El diseño de nuevos métodos para el tratamiento de aguas residuales, la elaboración de modelos más realistas para la dispersión de una enfermedad por contagio de un virus, el diseño de autos no contaminantes, etc. son ejemplos de lo anterior, encaminados a solucionar algunos de los problemas nacionales a los cuales nos debemos. Es este el objetivo del Congreso Multidisciplinario de Ciencias Aplicadas en Latinoamérica.

Los trabajos reunidos en esta obra han sido realizados por investigadores, ingenieros, tecnólogos, maestros y estudiantes que laboran en diferentes ramas del conocimiento, en diferentes universidades, centros de investigación o industrias de diferentes países de América y Europa. Se trata de un conjunto de trabajos de investigación sobre la ciencia y sus aplicaciones.

Indice

“Efecto de nanopartículas de CuO sobre la actividad antagónica y benéfica de <i>Trichoderma atroviride</i>”	1
1. Resumen	1
2. Introducción.....	1
3. Condiciones experimentales	2
4. Resultados y discusión	4
5. Conclusiones	8
6. Bibliografía.....	8
Biorrestauración de un suelo contaminado con hidrocarburos pesados de petróleo	10
1. Resumen	10
2. Introducción.....	10
3. Condiciones experimentales	11
4. Resultados y discusión	13
5. Conclusiones	19
6. Bibliografía.....	19
Evaluación potencial ligninolítico de <i>Lentinus strigosus</i> sobre harina de endocarpo de vaina de mezquite para la biodegradación de colorantes comerciales	20
1. Resumen	21
2. Introducción	21
3. Metodología	22
4. Resultados y discusión.....	23
5. Conclusión.....	27
6. Bibliografía	27
Fitoestabilización de jales mineros con cobertura de pastos	28
1.- Resumen	29

2.- Introducción.....	29
3.- Condiciones experimentales	30
4.- Resultados y discusión.....	33
5.- Conclusiones.....	37
6.- Bibliografía.....	37
PROPAGACIÓN <i>IN VITRO</i> DE AGAVE TOBALÁ (<i>Agave potatorum</i>) EN INMERSIÓN TEMPORAL.....	40
1. Resumen	40
2. Introducción	40
3. Condiciones experimentales	42
4. Resultados y discusión.....	42
5. Conclusiones.....	44
6. Bibliografía	45
Efecto de diferentes medios basales en el cultivo <i>in vitro</i> de Cactáceas	46
1. Resumen	46
2. Introducción.....	46
3. Condiciones experimentales	48
4. Resultados y discusión	48
5. Conclusiones.....	52
6. Bibliografía.....	52
Síntesis y caracterización de nanopartículas de selenio y quitosano para biofortificación de suelo cebollero y control fitopatógico en cultivo de cebolla	54
1. Resumen	54
2. Introducción.....	54
3. Condiciones experimentales	56
4. Resultados y discusión	58
5. Conclusiones.....	67

6. Bibliografía.....	67
Desarrollo de un flujómetro para la medición del gasto másico de contaminantes provenientes de motores de combustión interna	67
1. Resumen	67
2. Introducción	68
3. Condiciones experimentales.....	69
4. Resultados y discusión	74
5. Conclusiones	77
6. Bibliografía.....	78
Determinación de ¹⁴C en aerosoles atmosféricos en puertos marítimos. Influencia de combustibles fósiles.	79
1. Resumen	79
2. Introducción.....	79
3. Condiciones experimentales	83
4. Resultados y discusión	85
5. Conclusiones	88
6. Bibliografía.....	89
Interactividad y experiencias inmersivas en museos científicos: Potenciando la educación infantil.	90
1. Resumen	90
2. Introducción.....	90
4. Resultados y discusión	96
5. Conclusiones	97
6. Bibliografía.....	98
Determinación de las constantes cinéticas de la DBO del agua de un humedal sub-superficial de flujo horizontal.....	99
1. Resumen	100
2. Introducción.....	100

3. CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	101
4. Resultados y Discusión.....	104
5. Conclusiones	107
6. Bibliografía.....	108
COMPONENTES PREDOMINANTES DE UN SEDIMENTO CONTAMINADO Y SU AFINIDAD ADSORTIVA HACIA Cu	109
1. Resumen	109
2. Introducción.....	110
3. Condiciones experimentales	112
4. Resultados y discusión	114
5. Conclusiones	119
6. Bibliografía.....	119
Riesgos a la salud a trabajadores de sitios de disposición final	120
1. Resumen	120
2. Introducción.....	120
3. Condiciones experimentales	121
4. Resultados y discusión	123
5. Conclusiones	126
6. Bibliografía.....	127
Análisis multifractal de series temporales la concentración de NO₂ y O₃ en la Ciudad de México en el periodo de 2019 a 2022.....	128
1. Resumen	128
2. Introducción.....	129
3. Condiciones experimentales	129
4. Resultados y discusión	133
5. Conclusiones	137
Bibliografía.....	137

Estudio de correlaciones temporales en series de tiempo de las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno y Ozono troposférico monitoreadas en periodos estacionales durante el año Covid-19 en la Ciudad de México.....	138
1. Resumen	139
2. Introducción.....	139
3. Condiciones experimentales	141
4. Resultados y discusión	143
5. Conclusiones	146
6. Bibliografía.....	146
Determinación de condiciones experimentales óptimas para la Remoción de fluoruro de aguas subterráneas sintéticas empleando calcita	147
1. Resumen	148
2. Introducción.....	148
3. Condiciones experimentales	149
4. Resultados y discusión	152
5. Conclusiones	156
6. Bibliografía.....	157
Evaluación de la fertilidad de suelos cafetaleros, en el municipio de Huatusco, Veracruz.....	159
1.Resumen	160
2.Introducción.....	160
3.Condiciones experimentales	161
4.Resultados y discusión	163
5.Conclusiones	168
6.Bibliografía.....	168
Bagazo de caña de azúcar y cenizas de tolvas de hornos de bagazo industriales: Caracterización del carbón activado producido con ambos materiales	169
1 Resumen	170
2. Condiciones experimentales	171

3. Resultados y discusión	173
4. Cinética de adsorción	177
5. Conclusiones	180
6 Referencias	181
Movilidad y disolución de nanopartículas en columnas de suelo rizosférico inalterado de nogal..	184
1. Resumen	184
2. Introducción.....	184
3. Condiciones experimentales	185
4. Resultados y discusión	187
5. Conclusiones	190
6. Bibliografía.....	191
Bioaccesibilidad pulmonar en partículas del aire finas y ultrafinas (PM 10 y 2.5).	192
1.Introducción.....	193
2.Metodología	196
3. Resultados y discusión	198
4. Conclusiones	201
5. Rererencias	201
DESAROLLO DE EQUIPO PARA OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE LECHO MARINO	202
1. Resumen	202
2. Introducción.....	203
3. Antecedentes	203
4. Condiciones de operación	203
5. Características deseables	204
6.Nucleadores de múltiples tubos.....	204
7.Nucleador de caja tipo reineck	206
8.Extrusores de núcleos.....	208

9. Conclusion	209
10. Referencias	209
Nuevos hallazgos de palinomorfos cenozoicos en rocas carbonatadas de la base de la Formación Tehuacán, Puebla, México.	209
1. Resumen	210
2. Introducción.....	210
3. Condiciones experimentales	211
4. Resultados y discusión	212
5. Conclusiones	216
6. Bibliografía.....	217
Análisis comparativo del espectro polínico de mieles producidas por <i>Melipona beecheii</i> en Yucatán y Campeche, México.	217
1. Resumen	218
2. Introducción.....	218
3. Condiciones experimentales	219
4. Resultados y discusión	220
5. Conclusiones	224
6. Bibliografía.....	224
Percepciones sobre bienestar animal en estudiantes universitarios de agronomía: resultados e implicaciones para la ganadería sostenible.....	225
1.Resumen	226
2. Introducción.....	226
3. Metodología	227
4. Resultados y discusión	228
5. Conclusiones	231
6.Referencias	232
Ruta panorámica de conexión Escuinapa - Teacapán - Novillero.....	233

1. Resumen.....	233
2. Introducción	233
3. Turismo, Medio Ambiente Y Economía	235
4. Estrategia proyectual.....	236
5. Obra en marcha - Financiamiento	238
6. Conclusiones	241
7. Bibliografía.....	242
Sistema de autenticación para exámenes en línea con IoT	244
1. Resumen	244
2. Introducción.....	244
3. Condiciones experimentales	246
4. Resultados y discusión	253
5. Conclusiones.....	253
6. Bibliografía.....	253
Preguntas conceptuales en los exámenes de Ciencias Básicas	255
1. Resumen	255
2. Introducción.....	255
3. Cuestionario.....	257
4. Resultados y discusión	258
5. Conclusiones	260
6. Bibliografía.....	262
Comunicación socio digital por WhatsApp y e-mail como apoyo docente a una unidad de enseñanza-Aprendizaje (UEA) en la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco (UAM-A).	262
1. Resumen	262
2. Introducción.....	263
3. Condiciones experimentales	264

4. Resultados y discusión	267
5. Conclusiones	271
6. Bibliografía.....	271
Un primer acercamiento de académicos para facilitar el uso creativo de Metaversos para la educación usando la IAGen.	272
1. Resumen	272
2. Introducción.....	273
3. Interacción y preparación para entender el Metaverso	274
4. Resultados y discusión	276
5. Conclusiones	280
6. Bibliografía.....	280
Impacto de herramientas basadas en IA en la formación de alumnos de Licenciatura en Tecnologías de la Información.	281
1. Resumen	281
2. Introducción.....	281
3. Condiciones experimentales	283
4. Resultados y discusión	284
5. Conclusiones	285
6. <i>Bibliografía</i>	286
La deserción de los estudiantes a nivel superior: desde su perspectiva	286
1.- Resumen	286
2.- Introducción.....	287
3.- Condiciones experimentales	288
4.- Resultados y Discusión	289
5.- Conclusiones.....	293
6.- Bibliografía.....	293

DESARROLLO DE LABORATORIO VIRTUAL PARA EFECTUAR UN ENSAYO DE METALOGRAFIA	295
1. Resumen	295
2. Introducción.....	296
3. Descripción del escenario.....	297
4. Desarrollo.....	298
6. Conclusiones	305
7. Referencias	306
Estrategia de aprendizaje en los símbolos de los elementos químicos de la tabla periódica.....	307
1. Resumen	307
2. Introducción.....	307
3. Condiciones experimentales	309
4. Resultados y discusión	312
5. Conclusiones.....	316
6. Bibliografía.....	317
Una primera aproximación a los mecanismos de transferencia de energía	318
1. Resumen	318
2. Introducción.....	319
3. Condiciones experimentales	321
4. Resultados y discusión	322
5. Conclusiones.....	326
6. Bibliografía.....	327
Enseñanza de las ciencias a partir del relato histórico: de los primeros principios al cambio climático	328
1. Resumen	328
2. Introducción.....	328
3. Metodología	330

4. Resultados y discusión	334
5. Conclusiones	335
6.Referencias	335
Rediseño de modelo virtual de una caldera para uso en ambientes inmersivos	337
1. Resumen	337
2. Introducción.....	338
3. Marco Teórico	338
4. Rediseño del modelo de caldera con la técnica <i>Low Poly</i>	341
5. Análisis de resultados	345
6. Conclusiones	348
7. Bibliografía.....	349
El difícil camino hacia la autonomía universitaria.....	350
1.Resumen.	350
2.Introducción.....	350
3.Lucha por la autonomía.....	351
4.Fin de la autonomía.....	352
5.Vivir del cliente, no del gobierno.....	356
6.Conclusión	357
7.Bibliografía.....	357
Método didáctico de caracterización fotoeléctrica LED-Fotodiodo	358
1.Resumen	358
2. Introducción.....	358
3. Condiciones experimentales	359
4. Resultados y discusión	366
5. Conclusiones	367
6. Bibliografía.....	368

Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia en la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.....	368
1. Resumen	369
2. Introducción.....	369
3.Condiciones experimentales	370
4. Resultados y discusión	374
5.Conclusiones	375
6.Bibliografía.....	376
La tecnología aplicada en las salas virtuales es una necesidad en Instituto de Geología.	376
1. Resumen	377
2. Introducción.....	377
3. Condiciones experimentales	378
4. Resultados y discusión	385
5. Conclusiones.....	386
6. Bibliografía.....	387
Estudio de flujos de potencia y cortocircuito para una subestación rectificadora de la línea 12 del “Trolebús” de la CDMX.....	387
1. Resumen	388
2. Introducción.....	388
3. Condiciones Experimentales.....	389
4. Resultados Y Discusión.	397
5. Conclusiones.....	397
6. Bibliografía.....	397
Estudio de cortocircuito para una subestación del Sistema de Transporte Eléctrico “Cablebús” en cumplimiento del Código de red 2.0	398
1. Resumen	398
2. Introducción.....	398

3. Condiciones Experimentales.....	400
4. Resultados y Discusión.....	408
6. Bibliografía.....	408
Obtención de biocombustibles líquidos a partir de mezclas de biocrudos usando Ni-Pd en arcillas pilareadas con circonio	408
1. Resumen	409
2. Introducción.....	409
3. Condiciones experimentales	410
4. Resultados y discusión	411
5. Conclusiones	416
6. Bibliografía.....	416
Monitoreo de temperatura y humedad usando un servidor MQTT privado	417
1. Resumen	417
2. Introducción.....	418
3. Condiciones experimentales	421
4. Resultados y discusión	425
5. Conclusiones	427
6. Bibliografía.....	427
INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UN DINAMÓMETRO DE BANCO PARA MOTORES DE TURISMO	429
1.Resumen	429
2.Introducción.....	429
3.Condiciones experimentales	430
4.Resultados y discusión	438
5. Conclusiones	438
6.Bibliografía.....	439
Codificador-Decodificador CELP en tiempo real.....	440

1. Resumen	440
2. Introducción.....	440
3. Condiciones experimentales	441
4. Resultados y discusión	445
5. Conclusiones	449
6. Bibliografía.....	450
Desarrollo de un prototipo de Estación Sísmica (ES-II)	451
1. Resumen	451
2. Introducción.....	452
4. Resultados y discusión	461
5. Conclusiones	461
6. Bibliografía.....	462
Breve estudio sobre expresiones teóricas conocidas para la eficiencia de plantas térmicas convertidoras de energía.	463
1.Resumen	463
2. Introduction	463
3. Condiciones experimentales	466
4. Resultados y discusión	472
5. Conclusiones	473
6. Bibliografía.....	473
Modelado y Simulación de la propagación de una señal dentro de una guía-onda	475
1. Resumen	476
2. Introducción.....	476
3. Condiciones experimentales	478
4. Resultados y discusión	481
5. Conclusiones	486

6. Bibliografía.....	486
Manipulación de la Distorsión Armónica Mediante Técnicas de Aprendizaje Automatizado	487
1.Resumen	487
2.Introducción.....	487
3.Condiciones Experimentales	488
4.Resultados y discusión	491
5.Conclusiones	494
6.Bibliografía.....	495
Dispersión cuántica de fermiones de Dirac en grafeno monocapa unidimensional. Serna Duarte, E. J., ¹ Diago-Cisneros, L., ² Rodríguez Vargas I. ³	495
1.Resumen	496
2.Introducción.....	496
7. Condiciones experimentales	497
4. Resultados y discusión	502
5. Conclusiones	505
6. Bibliografía.....	506
Análisis de Estabilidad Global de un ciclo de Curzon-Ahlborn No-endorreversible, con gas de Van Der Waals como sustancia de trabajo.	507
1. Resumen	507
2. Introducción.....	507
3. Características del estado estacionario para la máquina de CA con un gas que obedece la ecuación de estado de Van der Waals.....	509
4. Análisis de Estabilidad global.	512
5. Conclusiones	518
6. Bibliografía.....	518
La física médica y su aplicación en el tratamiento de tumores cancerígenos.	520
1. Resumen	520

2. Introducción.....	520
3. Condiciones protocolarias.....	523
4. Resultados y discusión.....	528
5. Conclusiones.....	529
6. Bibliografía.....	529
Mejorando la confiabilidad operativa: Aplicación del AMEF en Equipos Industriales a Través de Casos de Estudio	
1. Resumen	530
2. Introducción.....	530
3. Condiciones experimentales	531
4. Resultados y discusión	535
5. Conclusiones.....	537
6. Bibliografía.....	537
Fórmulas para estimar los coeficientes de reacción de los contaminantes primario y secundario: aproximación lineal.....	
1. Resumen	538
2. Introducción.....	539
3. Modelo de dispersión	539
4. Ecuaciones para estimar los coeficientes de reacción σ y η	544
5. Conclusiones.....	551
6. Bibliografía.....	551
Estabilidad Turnpike en un Modelo Estocástico Controlado de Lotka-Volterra.....	
1.Introduction.....	552
2. Formulación del Problema	553
3. Simulaciones numéricas.	559
4. Análisis de los resultados.....	561
5.Conclusión.....	562

6.Referencias	562
Perspectiva de un potencial energético. Gradiente térmico en otoño en Bahía de La Paz, México y la zona oceánica adyacente	563
1. Resumen	563
2. Introducción.....	563
3. Condiciones experimentales	566
4. Resultados y discusión	567
5. Conclusiones	568
6. Bibliografía.....	570
Anillos generalizados de matrices con coeficientes en un campo.	571
1. Resumen	571
2. Introducción.....	572
3. Condiciones experimentales	572
4. Resultados y discusión	579
5. Conclusiones	579
6. Bibliografía.....	579
Determinación de la temperatura de gelificación para la caracterización reológica en hidrogeles para impresión 3D	580
1. Resumen	580
2. Introducción.....	580
3. Condiciones experimentales	582
4. Resultados y discusión	584
5. Conclusiones	589
6. Bibliografía.....	590
Diseño mecánico de una mesa XY para optimización y automatización en cortes con plasma.	591
1. Resumen	591
2. Introducción.....	592

3. Condiciones experimentales	593
4. Resultados y discusión	596
5. Conclusiones	603
6. Bibliografía.....	604
Análisis Estático para el husillo de una Máquina de Inyección de Plástico mediante el uso del Método de Elemento Finito.	605
1. Resumen	605
2. Introducción.....	605
3. Condiciones experimentales	608
4. Resultados y discusión	611
5. Conclusiones	613
6. Bibliografía.....	614
Análisis comparativo del efecto de geometrías tangentes y secantes en la sustentación y arrastre de puntas de avión de proyección individual de geometría base a plano de revolución.....	614
1. Resumen	615
2. Introducción.....	615
3. Condiciones experimentales	616
4. Resultados y discusión	620
5. Conclusiones	622
6. Bibliografía.....	623
Comparación de análisis numérico y analítico del esfuerzo de Von Mises en el riel de un CubeSat 2U.	624
1. Resumen	624
2. Introducción.....	624
3. Condiciones experimentales	625
4. Resultados y discusión	630
5. Conclusiones	630

6. Bibliografía.....	630
Diseño y construcción de un banco dinamométrico para motores de hasta 500 hp.....	631
1. Resumen	631
2. Introducción.....	631
3. Condiciones experimentales	633
4. Resultados y discusión	640
5. Conclusiones.....	641
6. Bibliografía.....	642
Análisis por elemento finito de un banco dinamométrico para motores de hasta 500 hp.....	642
1. Resumen.....	642
2. Introducción	643
3. Condiciones experimentales.....	643
4. Resultados y discusión	646
5. Conclusiones	650
6. Bibliografía.....	650
Estudio comparativo de la dureza del acero A36 antes y después de un envejecimiento acelerado por corrosión	651
1. Resumen	651
2. Introducción.....	651
3. Condiciones experimentales	653
4. Resultados y discusión	654
5. Conclusiones	657
6. Bibliografía.....	658
Diseño y análisis numérico de chasis para robot terrestre de rescate	659
1. Resumen.....	659
2. Introducción.....	660

3. Condiciones experimentales.....	663
4. Resultados y discusión	667
5. Conclusiones	668
6. Bibliografía.....	669
Técnicas novedosas aplicadas al análisis de engranes rectos.....	670
1. Resumen	670
2. Introducción.....	670
3. Condiciones experimentales	670
4. Resultados y discusión	678
5. Conclusiones	678
6. Bibliografía.....	679
Extracción ultrasónica de metabolitos secundarios de hojas de mastuerzo (<i>Tropaeolum majus</i>) y su aplicación en la biosíntesis de nanopartículas de plata.....	679
1. Resumen	680
2. Introducción.....	680
3. Condiciones experimentales	681
4. Resultados y discusión	682
6 Bibliografía.....	689
SÍNTESIS DE MOF UiO66-F ₄ NANOESTRUCTURADO EN MICROEMULSIONES	690
1. Resumen.....	690
2. Introducción	690
3. Condiciones experimentales	692
3.- Microemulsión Aceite-en-Agua (O/W) (O/W ZR-2EH 1:1)	693
4. Resultados y discusión	693
5. Conclusiones	696
6. Bibliografía.....	697

DISEÑO Y SÍNTESIS DE PUNTOS CUÁNTICOS DE ZNO-TEOFILINA PARA LA LIBERACIÓN DE UN NANOSISTEMA DIRIGIDO A LA PROTECCIÓN HEPÁTICA Y SU EVALUACIÓN EN RATAS.	698
1. Resumen	699
2. Introducción.....	699
3. Condiciones experimentales	700
4. Resultados y discusión	702
5. Conclusiones	705
6. Bibliografía.....	705
Monitorización del proceso de evaporación de líquidos solventes empleando un sensor de fibra óptica	706
1. Resumen	706
2. Introducción.....	706
3. Condiciones experimentales	707
4. Resultados y discusión	710
5. Conclusiones	713
6. Bibliografía.....	714
Depolimerización química de PET de desecho vía glicólisis, para la síntesis de BHET y su posterior esterificación para la obtención de DOTP.....	714
1. Resumen	715
2. Introducción.....	715
3. Condiciones experimentales	716
4. Resultados y discusión	719
5. Conclusiones	722
6. Bibliografía.....	723
Producción de tereftalato de dioctilo a partir de tereftalato de dimetilo obtenido mediante el reciclaje químico de poli-(tereftalato de etileno) de desecho vía metanólisis	724
1. Resumen	725
2. Introducción.....	725

3. Condiciones experimentales	726
4. Resultados y discusión	729
5. Conclusiones	734
6. Bibliografía.....	735
Metodología química automatizada para análisis de plomo en agua	735
1. Resumen	736
2. Introducción.....	736
3. Condiciones experimentales	738
4. Resultados y discusión	741
5. Conclusiones	746
6. Bibliografía.....	746
Síntesis y estudio de un material cerámico de níquel, zinc y hierro.....	748
1. Resumen	748
2. Introducción.....	749
3. Condiciones experimentales	750
4. Resultados y discusión	751
5. Conclusiones	756
6. Bibliografía.....	757
Desarrollo de una práctica de química analítica referente a una valoración potenciométrica mediante un procedimiento inusual para determinar la concentración y pureza de los constituyentes ácido-base en muestras acuosas.	758
1. Resumen.....	758
2. Introducción.....	758
3. Desarrollo experimental	760
4. Resultados y discusión	765
5. Conclusiones	767
6. Bibliografía.....	767

Construcción de ecuaciones químicas: Un método universal	768
1. Resumen	768
2. Introducción.....	768
3. El problema de construcción de ecuaciones químicas.....	770
4. Construcción de una ecuación química.....	773
5. Conclusiones.....	776
6. Bibliografía.....	776
Depolimerización química de tereftalato de polietileno de desecho mediante hidrolisis neutra, para la obtención de ácido tereftálico y su posterior esterificación a DOTP	777
1. Resumen	777
2. Introducción.....	778
3. Parte experimental.	782
4. Resultados y discusión.	786
5. Conclusiones	790
6. Bibliografía.....	791
Producción sostenible de glucosa a partir de bagazo de caña: Efectos de pretratamientos y ultrafiltración enzimática.....	795
1. Resumen	796
2. Introducción.....	796
3. Condiciones experimentales	797
4. Resultados y discusión	800
5. Conclusiones.....	804
6. Bibliografía.....	805
Optimización Bayesiana para el diseño secuencial de experimentos de un proceso de captura de CO₂.....	806
1. Resumen	806
2. Introducción.....	806

3. Condiciones experimentales	809
4. Resultados y discusión	810
5. Conclusiones	814
6. Bibliografía.....	814
Xylogenesi s en bosques mixtos del norte de México: Lecciones preliminares.....	815
1. Resumen	815
2. Introducci3n.....	815
3. Materiales y métodos.....	816
4. Resultados y Discusi3n	817
5. Conclusiones	821
6. Bibliografía.....	822
Material suplementario 1. Cálculo de IVI.....	823
Propiedades físicas de la madera de <i>Acacia pennatula</i> y <i>Trema micrantha</i>	824
1. Resumen	824
2. Introducci3n.....	825
3. Condiciones experimentales	826
4. Resultados y discusi3n	828
5. Conclusiones.....	831
6. Bibliografía.....	832
Características anatómicas de la madera de 2 especies forestales	833
1. Resumen	833
2. Introducci3n.....	833
3. Condiciones experimentales	834
4. Resultados y discusi3n	836
5. Conclusiones.....	840
6. Bibliografía.....	840

Estimación de parámetros de calidad del agua basada en datos	841
1. Resumen	841
2. Introducción.....	841
3. Condiciones experimentales	842
4. Resultados y discusión	846
5. Conclusiones.....	848
6. Bibliografía.....	848
Acreditación de un programa educativo de nivel licenciatura por parte de organismo evaluador nacional en el periodo 2017-2022.....	849
1. Resumen	850
2. Introducción.....	850
3. Metodología	851
4. Resultados y discusión	851
5. Conclusiones.....	858
6. Bibliografía.....	858
Modelamiento y Predicción del Valor de Activos en el mercado de las Principales Criptomonedas, utilizando Redes LSTM, Máquinas de Soporte Vectorial y Arima.	859
1. Resumen	859
2. Introducción.....	860
3. Condiciones experimentales	863
4. Resultados y discusión	868
6. Bibliografía.....	871
Evaluación del efecto de la depuración y supervisión en los sistemas computarizados de análisis seminal	871
1. Resumen	872
2. Introducción.....	872
3. Condiciones experimentales	873

4. Resultados y discusión	876
5. Conclusiones	878
6. Bibliografía.....	879
Modelo anatomico de becerro "<i>Bos primigenius taurus</i>" para disección tipo empleado en la enseñanza de la anatomía en la FMVZ-UNAM	880
1.- Resumen	880
2.- Introducción.....	881
3.- Materiales y métodos.....	883
4.- Resultados	884
5.- Conclusión.....	885
6.- Bibliografía.....	885
REPARACIÓN QUIRÚRGICA DE HERNIA COMO ALTERNATIVA EN LA PRODUCCIÓN PORCINA Y SU EFECTO EN EL BIENESTAR ANIMAL Y LA SIMULTÁNEA COMPARACIÓN ENTRE ANESTESIA INYECTADA E INHALADA.	886
1.Introducción.....	886
2. Material y Métodos.	887
3.Resultados y discusión.	887
4.Conclusiones.....	889
5.Referencias.	890
Evaluación de la producción de especies reactivas en espermatozoides bovinos criopreservados en dos medios comerciales adicionados con MitoTempo	890
1.Resumen	891
2.Introducción.....	892
3.Condiciones experimentales	893
4.Resultados y discusión	894
5.Conclusiones	897
6.Bibliografía.....	898

Evaluación de la producción de especies reactivas en espermatozoides bovinos criopreservados en dos medios comerciales adicionados con MitoTempo	899
1.Resumen	899
2.Introducción.....	900
3.Condiciones experimentales	901
4.Resultados y discusión	903
5.Conclusiones	906
6.Bibliografía.....	906
PARTICIPACIÓN DE EZRINA Y DE CaMKII EN LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBESTRUCTURA DE LA TECA PERINUCLEAR DE LOS ESPERMATOZOIDEOS DE VERRACO.	907
1. Resumen	908
2. Introducción.....	908
3. Condiciones experimentales	909
4. Resultados y discusión.	910
5. Conclusión.....	914
6. Bibliografía.....	915

“Efecto de nanopartículas de CuO sobre la actividad antagónica y benéfica de *Trichoderma atroviride*”

Arriaga García, B¹, Morales García, M¹, Herrera Pérez, G¹, Salas Leiva J¹, Pacheco Tena, C²,
González Chávez, S², Ramírez Valdespino, C¹

¹Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Miguel de Cervantes 120,
Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, CP 31136, México.

²Laboratorio PABIOM, Facultad de Medicina y Ciencias Biomédicas, Universidad
Autónoma de Chihuahua, Circuito Universitario Campus II, 31125, Chihuahua,
Chihuahua, México

marlyn.mg6@gmail.com; brenzarriaga@gmail.com; guillermo.herrera@cimav.edu.mx;
joan.salas@cimav.edu.mx; cfpacheco@uach.mx; sagonzalez@uach.mx;
claudia.ramirez@cimav.edu.mx

1. Resumen

Trichoderma es ampliamente estudiado por su actividad biocontroladora y bioestimulante del crecimiento vegetal, ayudando a mitigar el daño que fitopatógenos ocasionan sobre cultivos de interés agrícola. *Trichoderma* utiliza una gran batería de metabolitos secundarios, proteínas y moléculas efectoras para establecer sus asociaciones, tanto benéficas como antagónicas.

Por otro lado, la nanotecnología ha emergido como una alternativa en la agricultura, mediante la formulación de nanofertilizantes y nanopesticidas. Las nanopartículas de óxido de cobre (NPs-CuO) son de las más utilizadas, ya que se ha visto que presentan una alta actividad antimicrobiana, además de que, a concentraciones adecuadas, puede promover el crecimiento vegetal. Sin embargo, es poco lo que se conoce sobre su efecto en organismos benéficos, incluyendo *Trichoderma atroviride*.

En este trabajo se estudió el efecto que las NPs-CuO tienen en la actividad antagónica de *T. atroviride* sobre *Fusarium oxysporium* y sobre su actividad bioestimulante en plantas de maíz.

2. Introducción

Actualmente, el sector agrícola se ha vuelto dependiente del uso de fertilizantes y plaguicidas químicos, que han ido conduciendo a cambios en el microbioma del suelo, degradación de suelos y ecosistemas, además de contaminar el ambiente (Sharma et al., 2020). Por otro lado, el uso de microorganismos para biocontrolar patógenos y bioestimular cultivos de interés agrícola es una herramienta sustentable con efectos secundarios menores al ambiente (Omomowo & Babalola, 2019).

Dentro de los principales organismos utilizados en la agricultura, se encuentran los hongos del género *Trichoderma*, simbiontes oportunistas de plantas, capaces de promover el crecimiento e inducir la defensa vegetal mediante la liberación de moléculas efectoras (Guzmán Guzmán et al., 2017). Además, es un hongo capaz de atacar hongos patógenos de plantas, mediante diversas estrategias que incluyen parasitar las hifas (micoparasitismo), competencia por nutrientes y la antibiosis.

(Waghunde et al., 2016). Se ha reportado que es capaz de biocontrolar a especies de *Rizhoctonia*, *Alternaria*, *Botrytis*, *Colletrotrichum*, *Fusarium* entre otras (Romero Contreras et al., 2019; Matas Baca et al., 2022). Por otro lado, produce una gran cantidad de ácidos orgánicos que disminuyen el pH del suelo y promueven la solubilización de macro y micronutrientes esenciales para el desarrollo vegetal, incluidos el fósforo, magnesio, hierro y manganeso (Altomare et al., 1999; Bononi et al., 2020). Todas estas características vuelven a *Trichoderma* uno de los organismos más versátiles para su uso como controlador biológico.

Otra alternativa para el uso en la agricultura se basa en utilizar nanopartículas (NPs) de diferente naturaleza, que permitan mejorar los rendimientos o valores nutricionales de los cultivos, así como detectar factores de estrés biótico y abiótico (Fraceto et al., 2016; Nuruzzaman et al., 2016). Dentro de las principales NPs utilizadas destacan las NPs de óxidos metálicos, como TiO_2 , ZnO y CuO , que se ha visto que tienen la capacidad de inducir el crecimiento vegetal, sin embargo, esto dependerá del tamaño de las NPs, de la forma, concentración y del cultivo al que se apliquen, obteniendo incluso resultados contradictorios (Rajput et al., 2018; Šebesta et al., 2021). Con respecto a las NPs de CuO , se ha reportado que tienen efectos negativos sobre microorganismos del suelo (Xu et al., 2015). Sin embargo, se conoce poco sobre si este tipo de NPs presentan un efecto sobre hongos, específicamente benéficos y sus asociaciones.

En este trabajo, se evalúa el efecto que NPs de CuO presentan sobre *T. atroviride* y sus asociaciones, tanto benéficas, como patogénicas, con el fin de determinar si esta puede ser una alternativa para el desarrollo de bionanoformulaciones que sean amigables con el medio ambiente y ayuden a erradicar fitopatógenos de interés agrícola.

3. Condiciones experimentales

3.1 Material biológico.

La cepa *T. atroviride* IMI206040 fue amablemente donada por la Dra. Vianey Olmedo de la DCNE de la Universidad de Guanajuato. Se utilizó la cepa de colección de *F. oxysporum* f. sp. *Lycopersici* (ATCC MYA-4623). Se utilizaron semillas de maíz híbrido (Pioneer®) donadas por los agricultores de la zona de Delicias, Chihuahua.

3.2 Síntesis y caracterización de NPs de CuO .

Las NPs se sintetizaron siguiendo el método descrito por Lange y colaboradores (2010). Se realizó una caracterización mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) en el TEM JEOL JEM 2200 FS+CS. La caracterización estructural se realizó por difracción de Rayos X (DRX). También se realizó una caracterización por Raman y se determinó el tamaño promedio de las NPs, mediante el programa ImageJ.

3.3 Medio de cultivo.

Se utilizó medio PDA preparado como lo indica el fabricante (39 g/L). El medio que contenía las NPs de CuO se elaboró de la misma manera, pero una vez esterilizado, se mantuvo en agitación constante y se le agregaron 200 mg/L de las NPs, previamente sonicadas por 20 min, agitando por 15 min más. Después de ese tiempo, se vació en placas Petri.

3.4 Ensayos de antagonismo.

Las confrontaciones se realizaron siguiendo la metodología descrita por Guzmán Guzmán y col. (2017), con la diferencia que *F. oxysporum* se inoculó dos días antes que *T. atroviride*. Para las confrontaciones donde el medio contenía NPs de CuO, la metodología fue la misma, con la diferencia que el medio se preparó como anteriormente se describió. Las confrontaciones se incubaron a 28°C y se monitorearon durante 14 días.

3.5 Análisis de expresión de genes por RT-PCR.

Se diseñaron primers para los genes *gluc78*, *bgn 13.1*, *ech42*, *prb1*, *tal6* y *gpd* de *T. atroviride*, utilizando la página OligoAnalyzer® (detalles de los primers en Ramírez Valdespino et al., manuscrito en preparación). Se realizó la colecta de micelio de *Trichoderma* en confrontación con *Fusarium* antes (T1), durante (T2) y después (T3) del contacto. Las confrontaciones se llevaron a cabo como se describió anteriormente, sólo que al medio PDA se le coloca papel celofán estéril y sobre éste, se ponen los bocados de los hongos. Los ensayos se realizaron por triplicado y el micelio colectado se almacena a -20°C. Para la extracción de RNA total de *T. atroviride* se utilizó el método TRIzol™ (Reagent de Thermo Fisher SCIENTIFIC), siguiendo las especificaciones del fabricante. Para la síntesis de cDNA se usó RNA extraído de las muestras obtenidas de los diferentes tiempos de colecta de micelio, con sus respectivas repeticiones, utilizando RevertAid H Minus First Strand cDNA Syntesis Kit Thermo Scientific®, y siguiendo las indicaciones del proveedor. Para los RT-PCR's se utilizó el cDNA sintetizado anteriormente. Las condiciones de amplificación fueron las siguientes: una desnaturalización inicial de 95 °C por 5 min, seguida de 28 ciclos a 95 °C /30 s, temperatura óptima de los oligonucleótidos por 1 min y 72 °C/1 min, y una extensión final de 72 °C /5 min. Las muestras se analizaron por electroforesis en geles de agarosa al 1 %. Se cargaron 8 microlitros de las muestras y las electroforesis se efectuaron a 90 V por 40-60 min. Para los análisis densitométricos, se utilizó el programa ImageJ 1.48v (Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA. <http://imagej.nih.gov/ij>). El análisis estadístico que se utilizó fue la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$).

3.6 Interacción planta-*Trichoderma-Fusarium*-NPs de CuO.

Las semillas de maíz se esterilizaron, utilizando, agua y jabón, una solución de hipoclorito de sodio al 3 % y etanol al 70 % (Gravel, et al., 2007). Posteriormente, se sembraron en vermiculita previamente esterilizada, donde se dejaron por cinco días. Pasados los cinco días, las plántulas de maíz se trasplantaron a recipientes con la mezcla peat moss, vermiculita y perlita estériles (3:1:1), donde permanecieron durante cinco semanas. A la primera semana del trasplante se aplicaron los tratamientos correspondientes, 1 mL a cada planta de *T. atroviride* y *F. oxysporum* con una concentración de 1×10^6 conidias/mL y 1×10^7 conidias/mL, respectivamente. Antes de la aplicación se realizó un corte en las raíces de las plantas, siguiendo la metodología Ramírez y col. (2020).

La aplicación de las nanopartículas se realizó siguiendo el procedimiento de Morales-García (Tesis de Maestría, 2020): se pesaron las NPs de CuO para una concentración de 200 ppm y se sonicaron durante 30 min antes de cada aplicación. La cantidad y aplicación se realizó simulando las condiciones efectuadas en campo; se realizó la aspersión a la primera y cuarta semana de ser trasplantadas. Los tratamientos fueron: control, *T. atroviride*, *F. oxysporum*, NPs de CuO, *T. atroviride*+*F. oxysporum*, *T.*

atroviride+NPs de CuO, *F. oxysporum*+NPs de CuO, y *T.atroviride*+*F.oxysporum*+NPs de CuO, realizándolos por triplicado, con 15 individuos por réplica.

4. Resultados y discusión

4.1 Síntesis de las NPs de CuO.

Se obtuvieron NPs de CuO con un tamaño promedio de 4.7 nm, de forma cuasi esférica con tendencia a formar aglomeraciones, de manera similar a lo reportado por Lange y colaboradores (2010) y Ramírez Valdespino y colaboradores (2020) (Figura 1).

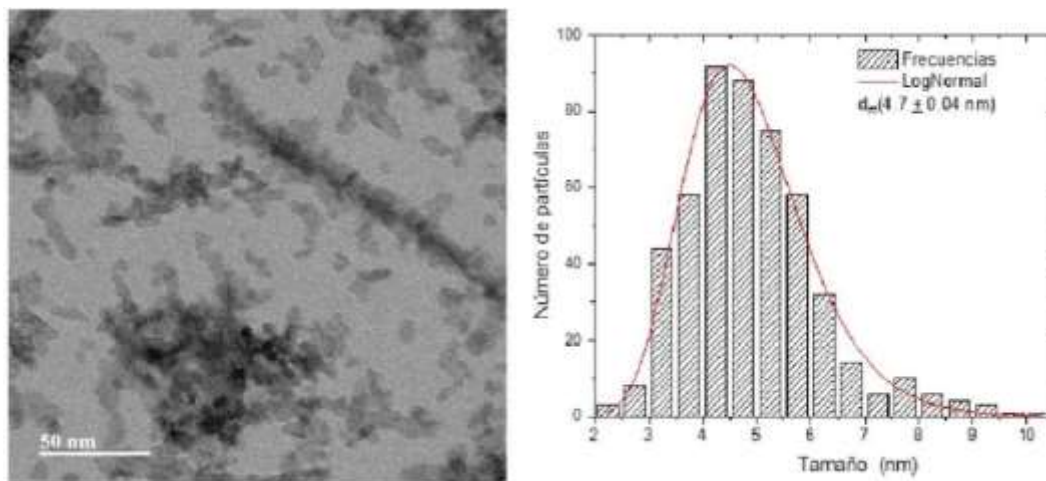


Figura 1. Morfología y tamaño de las NPs de CuO Micrografía de las NPs de CuO obtenida con un Microscopio Electrónico de Trasmisión y el tamaño promedio de las NPs obtenido mediante un histograma de frecuencias.

Para los análisis del patrón de difracción de Rayos X se realizó un refinamiento el método de Rietveld, considerando una fase monoclinica con grupo espacial C2/c. Se obtuvo una bondad del ajuste de 0.87, 0.76 y 0.84, para las NPs. Al término del refinamiento los parámetros de celda unitaria quedaron como: $a = 4.6975 \text{ \AA}$, $b = 3.4143 \text{ \AA}$ y $c = 5.1537 \text{ \AA}$. Luego, se comparó el patrón de difracción obtenido con el calculado (Ycalc). Teniendo como resultado que se trata del mismo material, ya que poseen las mismas características. Mediante el método de armónicos esféricos y la función matemática Thompson-Cox-Hasting pseudo-Voigt se obtuvo el tamaño promedio aparente de $5.9 \pm 1 \text{ nm}$ de las NPs de CuO por medio de la ecuación Scherrer y la morfología arrojó una forma cuasi-esférica.

Para corroborar la información cristalográfica se realizó espectroscopia Raman de las NPs. El espectro se tomó a 633 nm de longitud de onda de excitación con láser V a temperatura ambiente. Para el análisis y ajuste se utilizó el software Fityk, donde se utilizaron las bandas Raman y se identificaron los modos de vibración usando la notación Mulliken. La primera banda Raman tiene un valor de 276.849 cm^{-1} , que corresponde al rango de rotación de los átomos de cobre y oxígeno en fase monoclinica Se obtuvieron valores de la ocurrencia de los modos Bg1 (331.899 cm^{-1}) y Bg2

(604.982 cm⁻¹), correspondientes a la flexión y estiramiento simétrico del oxígeno de CuO, los valores de los modos coinciden con los reportados por Siddiqui, y col. (2020).

4.2 Ensayos de antagonismo de *T. atroviride* contra *F. oxysporum*.

En la Figura 2 se observan los resultados de los ensayos de antagonismos de *T. atroviride* y *F. oxysporum*, en la parte superior se encuentran creciendo en medio PDA y en la inferior en medio PDA adicionado con 200 ppm de NPs de CuO, fotografiados cada dos días y monitoreado durante 14 días. Se puede apreciar que, a partir del quinto día, *T. atroviride* delimita notablemente el crecimiento de *Fusarium*. Conforme van pasando los días se observa una ligera diferencia entre los dos tratamientos, presentando un menor crecimiento y una mayor esporulación en el medio que contenía las NPs de CuO. Es bien conocido que especies de *Trichoderma* son capaces de biocontrolar a *Fusarium*, sin embargo, la presencia de las NPs de CuO reduce esta actividad, a pesar de que se ha reportado que NPs de CuO tienen un efecto inhibitorio en el crecimiento de *Fusarium* (Banik y Luque, 2017; López Mondéjar et al., 2011).

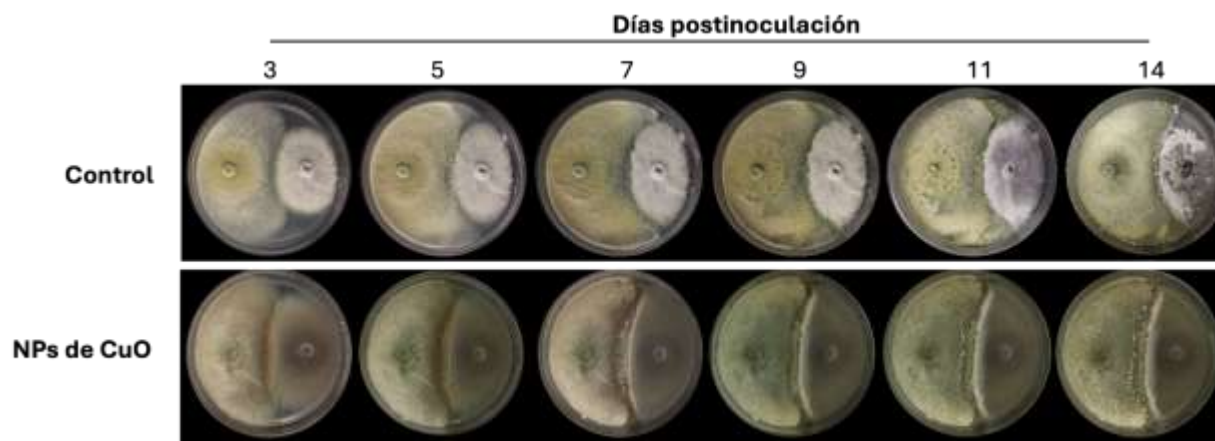


Figura 2. Ensayos antagónicos de *T. atroviride* sobre *F. oxysporum*. Se muestran placas representativas de la confrontación únicamente en medio PDA (control) y en medio con 200 ppm de NPs de CuO.

4.3 Análisis de expresión de genes asociados a micoparasitismo.

Para evaluar el efecto de las NPs de CuO en el proceso micoparasítico de *T. atroviride*, se realizó un análisis semicuantitativo de expresión de los genes relacionados al micoparasitismo. En la Figura 3 se muestra una imagen representativa de los patrones de expresión de los 5 genes analizados: *gluc78*, *tal6*, *ech42*, *prb1* y *bgn13.1*; a diferentes tiempos: antes (T1), durante (T2) y después (T3) del contacto con *F. oxysporum*, en ausencia y presencia de NPs de CuO, utilizando *gpd* como control endógeno. Los genes *prb1*, *ech42* y *bgn13.1* fueron aumentando su expresión conforme los tiempos de contacto, se observó una inducción de su expresión en presencia de NPs de CuO. Contrariamente *gluc78* y *tal6*, se expresan en mayor cantidad antes del contacto en ausencia de NPs de CuO.

Los resultados indican que la presencia de las NPs de CuO induce la expresión de los genes analizados, durante y después de la interacción con *F. oxysporum*, por lo que se podría sugerir que

una mezcla de *T. atroviride* y las NPs de CuO tendrá un mayor efecto en la inhibición de *F. oxysporum* a una concentración de 200 ppm.

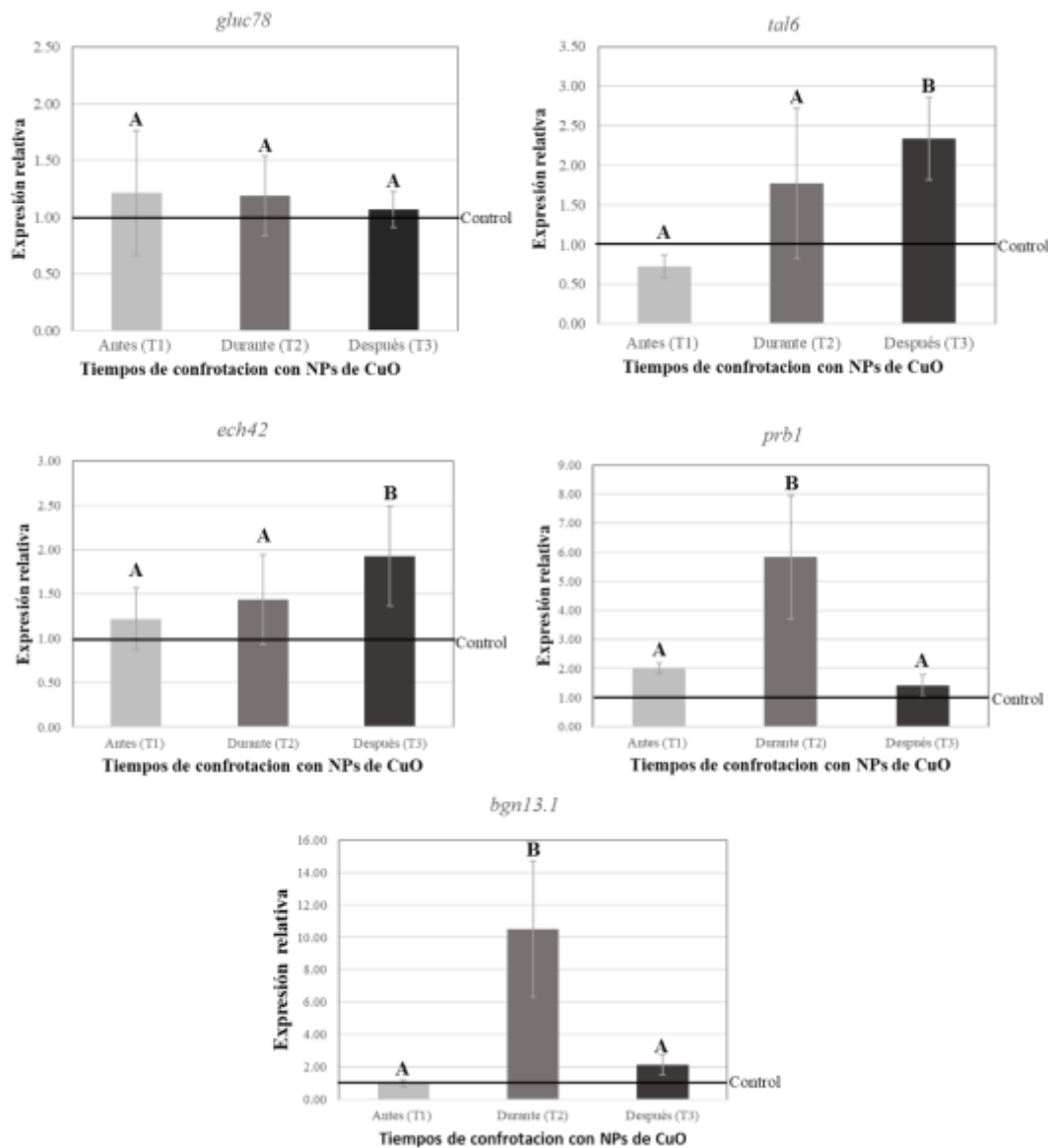


Figura 3. Patrones de expresión de genes de *Trichoderma* asociados a micoparasitismo. Análisis densitométrico de geles de agarosa para los genes, *gluc78*, *tal6*, *ech42*, *prb1* y *bgn13.1* de *T. atroviride* confrontado con *F. oxysporum* en presencia de NPs de CuO. Evaluado y analizados en tres tiempos de interacción (T1, T2, T3), mediante la prueba de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$). Tratamientos con la misma letra no muestran diferencias significativas.

4.4 Interacciones Planta-*Trichoderma*-*Fusarium*-NPs de CuO.

Pasadas cinco semanas, se obtuvieron las mediciones de las plantas de maíz: longitud del tallo y altura total de la planta, número de hojas, peso fresco y peso seco, tanto de raíz como de parte aérea.

En la Figura 4, se observa que las plántulas de maíz en interacción con *T. atroviride* mostraron mayor crecimiento radicular, aunque no se pudo apreciar claramente debido al enrollamiento de la raíz que presentaron las plantas. También se observó una mayor altura en los tratamientos de interacción tripartite (maíz--hongos-NPs de CuO). En los tratamientos con *F. oxysporum*, se observaron plantas más pequeñas y con menor número de hojas. En el tratamiento con NPs de CuO se observó un mayor crecimiento de raíz con respecto al control, sin embargo, en la altura total no se apreciaron diferencias. También se obtuvieron tamaños similares en las plantas con *T. atroviride*, *T. atroviride* con NPs de CuO, y *T. atroviride*-*F. oxysporum*-NPs de CuO.

Al realizar los análisis estadísticos, se obtuvo una disminución significativa en el tamaño de las plantas de maíz inoculadas con *F. oxysporum*, teniendo un impacto en la planta, principalmente en la longitud de tallo (11.8 cm) y altura total (47.02 cm) con respecto a los demás tratamientos. Por otro lado, las plantas inoculadas con *F. oxysporum* y *T. atroviride* mostraron un aumento de casi 2 cm en tallo y de casi 6 cm en altura, indicando un efecto antagónico por parte de *T. atroviride*. De igual manera, en el tratamiento de *F. oxysporum* con NPs de CuO se observó el mismo comportamiento de inhibición. En el tratamiento con NPs de CuO, no hubo una diferencia significativa en la longitud de tallo, no así en altura, ya que se vio una ligera disminución con respecto al control. Por otro lado, en el tratamiento con *T. atroviride*, se observó su efecto benéfico, ya que alcanzó una altura máxima de 56.47 cm y una longitud de tallo de 14.12 cm, mostrando diferencias significativas. Otros tratamientos que siguieron la misma tendencia fueron los tratamientos de las interacciones de maíz-*Trichoderma*-NPs de CuO y maíz-*Trichoderma*-*Fusarium*-NPs de CuO, observándose aquí los mayores crecimientos aéreos.

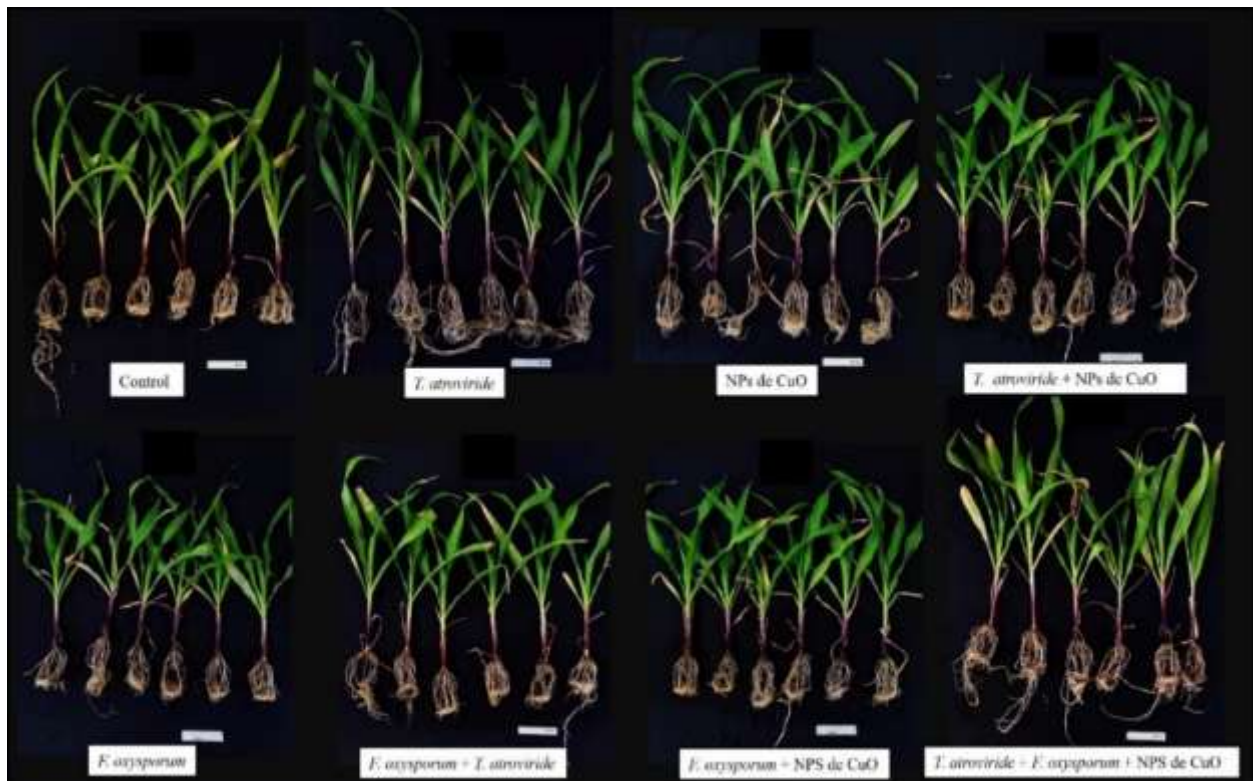


Figura 4. Ensayos de la interacción planta-hongos-NPs de CuO, para evaluar el efecto de las NPs de CuO, sobre las propiedades benéficas y antagónicas de T. atroviride. Imágenes representativas de plantas maíz de 6 semanas.

Los resultados obtenidos de la interacción tripartita y tetrapartita, mostraron una tendencia en el crecimiento y desarrollo aéreo, tanto en longitud de tallo, altura total y número de hojas. Observándose un efecto positivo en el uso de NPs CuO con *T. atroviride* para contrarrestar la patogenicidad de *F. oxysporum* sobre la planta de maíz, a pesar de que este sólo causó síntomas ligeros en la planta. Es importante destacar que no se han reportado estudios tetrapartitos de maíz-*Trichoderma*-*Fusarium*-NPs de CuO, por lo que este trabajo es pionero en la búsqueda de generar bionanoformulaciones que contengan a *T. atroviride* y NPs de CuO a una concentración de 200 ppm, con un tamaño de 4.7 ± 0.04 nm y una forma cuasi-esférica, para inhibir el desarrollo del fitopatógeno, *F. oxysporum*, quien es el causante de la pudrición de raíz y tallo del maíz.

5. Conclusiones

Los resultados sugieren que la formulación de un producto dual de NPs de CuO y *T. atroviride* puede ser una herramienta que utilizar para contrarrestar a *F. oxysporum* y promover un mejor desarrollo en plantas de maíz.

6. Bibliografía

- Altomare, C., Norvell, W. A., Björkman, T. H. O. M. A. S., & Harman, G. (1999). Solubilization of phosphates and micronutrients by the plant-growth-promoting and biocontrol fungus *Trichoderma harzianum* Rifai 1295-22. *Applied and environmental microbiology*, 65(7), 2926-2933. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.7.2926-2933.1999>
- Banik, S., & Pérez-de-Luque, A. (2017). In vitro effects of copper nanoparticles on plant pathogens, beneficial microbes and crop plants. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15(2), e1005-e1005. <https://doi.org/10.5424/sjar/2017152-10305>
- Bononi, L., Chiaramonte, J. B., Pansa, C. C., Moitinho, M. A., & Melo, I. S. (2020). Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth. *Scientific Reports*, 10(1), 2858. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59793-8>
- Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: which innovation potential does it have? *Frontiers in Environmental Science*, 4, 186737. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00020>
- Gravel, V., Antoun, H., & Tweddell, R. J. (2007). Growth stimulation and fruit yield improvement of greenhouse tomato plants by inoculation with *Pseudomonas putida* or *Trichoderma atroviride*: possible role of indole acetic acid (IAA). *Soil biology and Biochemistry*, 39(8), 1968-1977. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.015>
- Guzmán-Guzmán, P., Alemán-Duarte, M. I., Delaye, L., Herrera-Estrella, A., & Olmedo-Monfil, V. (2017). Identification of effector-like proteins in *Trichoderma* spp. and role of a hydrophobin in the plant-fungus interaction and mycoparasitism. *BMC genetics*, 18, 1-20. <https://doi.org/10.1186/s12863-017-0481-y>
- Lanje, A. S., Sharma, S. J., Pode, R. B., & Ningthoujam, R. S. (2010). Synthesis and optical characterization of copper oxide nanoparticles. *Adv Appl Sci Res*, 1(2), 36-40.
- López-Mondéjar, R., Ros, M., & Pascual, J. A. (2011). Mycoparasitism-related genes expression of *Trichoderma harzianum* isolates to evaluate their efficacy as biological control agent. *Biological Control*, 56(1), 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2010.10.003>
- Matas-Baca, M. Á., García, C. U., Pérez-Álvarez, S., Flores-Córdova, M. A., Escobedo-Bonilla, C. M., Magallanes-Tapia, M. A., & Chávez, E. S. (2022). Morphological and molecular

- characterization of a new autochthonous *Trichoderma* sp. isolate and its biocontrol efficacy against *Alternaria* sp. Saudi Journal of Biological Sciences, 29(4), 2620-2625. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.052>
10. Morales-García, M., 2020. Caracterización de la actividad micoparasítica y benéfica de un aislado de *Trichoderma viride* en presencia de nanopartículas de CuO. CIMAV, Chihuahua.: Tesis de maestría en ciencia y tecnología ambiental.
 11. Nuruzzaman, M. D., Rahman, M. M., Liu, Y., & Naidu, R. (2016). Nanoencapsulation, nano-guard for pesticides: a new window for safe application. Journal of agricultural and food chemistry, 64(7), 1447-1483. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05214>
 12. Omomowo, O. I., & Babalola, O. O. (2019). Bacterial and fungal endophytes: tiny giants with immense beneficial potential for plant growth and sustainable agricultural productivity. Microorganisms, 7(11), 481. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7110481>
 13. Rajput, V. D., Minkina, T., Suskova, S., Mandzhieva, S., Tsitsuashvili, V., Chaplugin, V., & Fedorenko, A. (2018). Effects of copper nanoparticles (CuO NPs) on crop plants: a mini review. BioNanoScience, 8, 36-42. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0466-3>
 14. Ramírez, P. G., Ramírez, D. G., Mejía, E. Z., Ocampo, S. A., Díaz, C. N., & Martínez, R. I. R. (2020). Extracts of *Stevia rebaudiana* against *Fusarium oxysporum* associated with tomato cultivation. Scientia Horticulturae, 259, 108683. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108683>
 15. Ramírez-Valdespino, C. A., Morales-García, M., Herrera-Perez, G. & Orrantia-Borunda, E., 2020. Synthesis and Characterization of CuO Nanoparticles and Their Effect in Alfalfa. Microsc. Microanal., 26(2), pp. 1276-1277. <https://doi.org/10.1017/S1431927620017559>
 16. Romero-Contreras, Y. J., Ramírez-Valdespino, C. A., Guzmán-Guzmán, P., Macías-Segoviano, J. I., Villagómez-Castro, J. C., & Olmedo-Monfil, V. (2019). Tal6 from *Trichoderma atroviride* is a LysM effector involved in mycoparasitism and plant association. Frontiers in Microbiology, 10, 2231. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02231>
 17. Šebesta, M., Kolenčík, M., Sunil, B. R., Illa, R., Mosnáček, J., Ingle, A. P., & Urík, M. (2021). Field application of ZnO and TiO₂ nanoparticles on agricultural plants. Agronomy, 11(11), 2281. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112281>
 18. Sharma, A. K., Sharma, D., & Chopra, A. K. (2020). An overview of pesticides in the development of agriculture crops. Journal of Applied and Natural Science, 12(2), 101-109. <https://doi.org/10.31018/jans.vi.2254>
 19. Siddiqui, H., Qureshi, M. S., & Haque, F. Z. (2020). Biosynthesis of flower-shaped CuO nanostructures and their photocatalytic and antibacterial activities. Nano-Micro Letters, 12, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40820-019-0357-y>
 20. Waghunde, R. R., Shelake, R. M., & Sabalpara, A. N. (2016). *Trichoderma*: A significant fungus for agriculture and environment. African journal of agricultural research, 11(22), 1952-1965. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10584>
 21. Xu, C., Peng, C., Sun, L., Zhang, S., Huang, H., Chen, Y., & Shi, J. (2015). Distinctive effects of TiO₂ and CuO nanoparticles on soil microbes and their community structures in flooded paddy soil. Soil Biology and Biochemistry, 86, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.03.011>

Biorrestauración de un suelo contaminado con hidrocarburos pesados de petróleo

Quintana D. B.¹, Méndez S. J. G¹, Sotelo N. P. X.¹, Beltrán V. M.¹ Nuño L. L.¹

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco

Av. San Pablo 420, Colonia Nueva el Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, 02128, CDMX

mbqd@azc.uam.mx, perlaso@azc.uam.mx, lnl@azc.uam.mx, mbv@azc.uam.mx

1. Resumen

Uno de los principales problemas ambientales en México, es el debido a la contaminación por derrame accidental de hidrocarburos. En este trabajo se evaluó la eficiencia de la biorrestauración de un suelo contaminado con combustóleo con alta, media y baja concentración empleando la bacteria *Pseudomonas putida*. Esta bacteria se utilizó por su capacidad de degradar y metabolizar una amplia gama de compuestos, además de que no altera las características y propiedades del suelo. Se llevó a cabo un proceso de bioaumentación en reactores a temperatura ambiente, por 60 días, donde se obtuvieron eficiencias entre 53.8 % y hasta del 80 %, en condiciones de incubación a 37 °C, entre 26 y 50.5 %; y por atenuación natural ente 14.16 a 33.7 % de eficiencia.

2. Introducción

Algunas de las afectaciones ambientales resultantes por el uso de combustibles derivados del petróleo son los derrames accidentales o provocados; ya que contaminan suelos y disminuyen la actividad biológica, que limita la disponibilidad de nutrientes generando degradación.

Actualmente, la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación, es la norma vigente ^[1]; que regula la concentración permisible según el uso de suelo.

Es muy importante la actividad petrolera en México, ya que las estimaciones para 2024 marcan una contribución del 4.9 % del PIB ^[2]. La exploración de los sitios de extracción y producción, contribuyeron con el 74.2 % del total de eventos de derrames en el año 2021; sin contar con el transporte y el uso de combustibles fósiles ^[3]. Al tratarse de sustancias tóxicas, éstas dañan la salud de las personas y de los ecosistemas, así como pérdidas económicas.

Las tecnologías de remediación buscan alterar la composición de sustancias peligrosas o contaminantes a través de medios químicos, biológicos o físicos para reducir la toxicidad, movilidad o volumen de los materiales contaminados que están siendo tratados. Se emplean principalmente: tratamientos térmicos (utilizan calor para incrementar la volatilización, descomponer o fundir los contaminantes en el suelo), tratamientos fisicoquímicos (lavado, oxidación, neutralización) y tratamientos biológicos (biorremediación).

La biorremediación es un proceso en el que los microorganismos endógenos o inoculados degradan (metabolizan) los contaminantes orgánicos que se encuentran en el suelo, además es un proceso que intenta acelerar el proceso natural de biodegradación proporcionando nutrientes, aceptores de electrones y microorganismos degradantes competentes que de otro modo podrían limitar la rápida conversión de sustancias orgánicas contaminantes en productos finales inocuos ^[4].

La elección de cualquiera de estas tecnologías, depende de factores como el tipo y concentración de hidrocarburos presentes en el suelo, las condiciones ambientales y la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos. Cualquiera de estas tecnologías debe cumplir con los criterios establecidos en la norma oficial mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, que establece los límites máximos de hidrocarburos en el suelo, así como también las características para efectuar el muestreo y la remediación ^[1].

En este caso, para la degradación de los hidrocarburos pesados de petróleo se empleó la técnica de la biorremediación, con la bacteria *Pseudomonas putida*, la cual se encuentra en el suelo o se puede inocular, ya que tiene la capacidad de adaptarse a diferentes condiciones, degradar una amplia gama de compuestos, lo que la hace especialmente eficiente ^{[5] [6]}.

3. Condiciones experimentales

3.1 Obtención del suelo

La recolección del suelo se efectuó en un predio contaminado con hidrocarburos pesados de petróleo, determinados como Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) debido a la fisura de depósitos de almacenamiento enterrados en el sitio, que sufrieron rupturas por maquinaria pesada. Se tomaron tres muestras de suelo con diferente concentración, definiendo la muestra C1- concentración alta de HTP en el sitio del derrame, C2- concentración media de HTP a 1 m de distancia del derrame y C3- concentración baja de HTP a 3 m de distancia del derrame y una muestra testigo de la zona sin la influencia del derrame.

3.2 Caracterización fisicoquímica del suelo

Se realizó según los parámetros mencionados en la NOM-021-SEMARNAT- 2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis ^[7]. La caracterización se realizó antes y después del proceso de biorremediación. En la Tabla 1 se describen los parámetros y el método empleado para su evaluación.

Tabla 1. Parámetros en la caracterización fisicoquímica del suelo

Parámetros	Método
pH	AS-02 con potenciómetro
Color	AS-22 Tablas Munsell
Conductividad eléctrica	AS-18 con conductímetro
Textura del suelo	AS-09 de Bouyoucos
Densidad real	AS-04 con parafina
Densidad aparente	AS-03 con picnómetro
Porosidad	Relación entre densidad real y densidad aparente
Humedad	AS-05 por gravimetría
Materia orgánica	AS-07 de Walkley Black
Nitrógeno	AS 08 micro Kjeldahl
Relación C/N	Relación entre la determinación de materia orgánica y Nitrógeno
Nutrientes	Colorimetría Test Kit HANNA Instruments (cualitativo)

3.3 Concentración de hidrocarburos totales de petróleo (HTP)

La concentración de los HTP fue determinada según se especifica en la NOM-138-SEMARNAT/SS-2012, donde se refiere la NMX-AA-134-SCFI-2006, Suelos-hidrocarburos fracción pesada por extracción y gravimetría, método de prueba ^[3].

Para la determinación de los HTP se usó el método Soxhlet, que es una extracción sólido-líquido, donde los hidrocarburos contenidos en el suelo se extraen por medio de un disolvente orgánico (n-hexano), el cual se mantiene en refluxo a través de una muestra de suelo dentro de un cartucho de celulosa por 6 h.

Para la extracción se utilizó 1 g de suelo con 120 mL de n-hexano. Una vez extraídos los HTP con el n-hexano, se procedió a una destilación para su separación y por gravimetría se determinó la concentración de HTP, tomando en cuenta la cantidad y humedad de la muestra, los análisis se realizaron por duplicado para comparar la eficiencia del proceso.

3.4 Crecimiento microbiano

La bacteria *Pseudomonas putida* fue adquirida en la colección microbiana del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), mantenida en agar nutritivo. Para el crecimiento microbiano, se empleó caldo nutritivo y caldo lactosado, se empleó el método de turbidimetría, en el cual se relaciona el crecimiento microbiano como función de la turbidez del medio. El análisis se realizó con un espectrofotómetro modelo Spectronic 21D y las mediciones se realizaron a una absorbancia de 600 nm por duplicado.

3.5 Biorremediación *ex situ*

La biorremediación se realizó en biorreactores que contenían 15 g de suelo con 15 mL de solución de bacterias (*Pseudomonas putida* en caldo nutritivo), para tres condiciones experimentales:

- 1) Biodegradación a temperatura ambiente, una vez dispuesta la solución de bacterias en el suelo se trabajó con tres tiempos para el proceso de degradación, 30, 45 y 60 días, donde para cada tiempo se tuvieron 4 réplicas para cada una de las concentraciones.
- 2) Biodegradación a condiciones de incubación, esta etapa se esterilizó el suelo contaminado y se le agregó la solución bacteriana en reactores que fueron puestos a incubación durante 60 días a una temperatura de 37°C (temperatura óptima de crecimiento de la bacteria). Se evaluó el proceso de degradación después de los 60 días en la incubadora.
- 3) Biodegradación por atenuación natural, para este proceso se suministraron 15 mL de agua al suelo, sin bacterias. Se trabajó únicamente con un tiempo de 60 días y para cada concentración se colocaron los reactores por triplicado.

En la figura 2 se muestra el esquema general del procedimiento experimental utilizado.

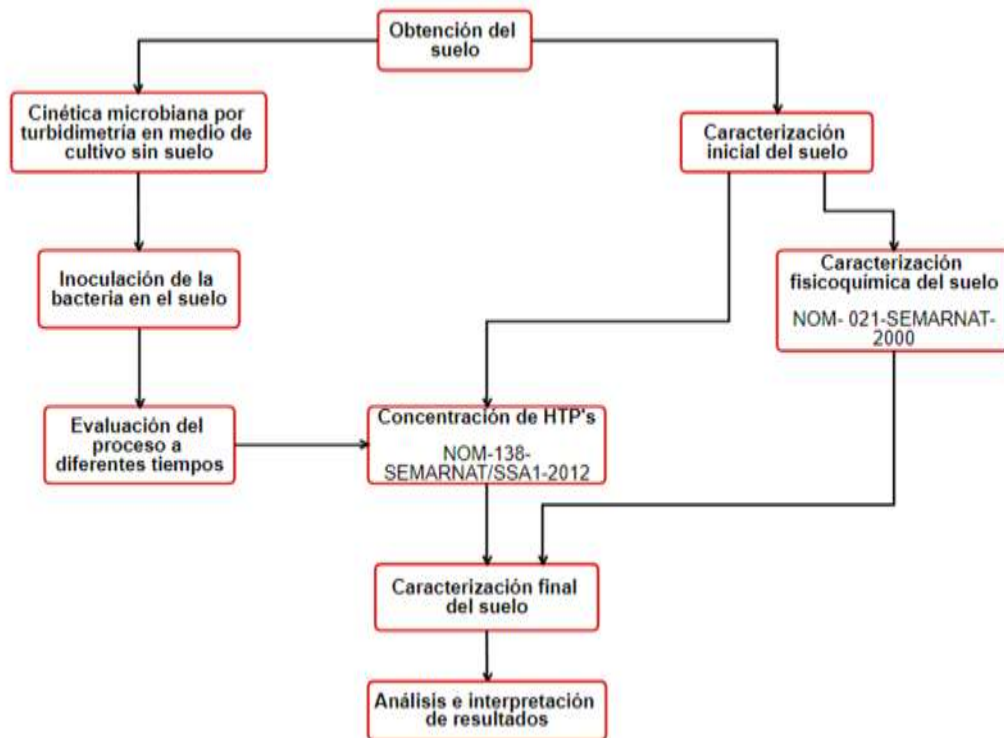


Figura 2. Procedimiento experimental

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización fisicoquímica del suelo

En la tabla 2 se muestra la caracterización inicial del suelo testigo, así como también de los suelos contaminados de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM- 021-SEMARNAT-2000 [7].

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica inicial del suelo testigo y contaminado

	Testigo	Suelo baja concentración	Suelo media concentración	Suelo alta concentración
Color	Light browish gray	Very dark grayish brown	Very dark brown	Reddish black
	10 YR 6/2	10 YR 3/2	7.5 YR 2.5/2	7.5 YR 2.5/1
pH (unidades)	7.11±0.0	7.43±0.01	7.43±0.01	7.4±0.011
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.15±0.05	0.04±0.01	0.05±0.02	0.049±0.01
Densidad aparente (g/cm ³)	0.92±0.02	0.98±0.004	0.98±0.01	0.85±0.01
Densidad real (g/cm ³)	2.41±0.03	*	*	*
Espacio poroso (%)	61.51±0.31	*	*	*
Humedad higroscópica (%)	3.25±0.38	*	*	*
Humedad capilar (%)	29.76±0.86	*	*	*
Humedad a Capacidad de Campo (%)	33.01±0.48	*	*	*
Textura	Suelo Franco Arenoso	*	*	*
Composición textural	80% Arena	*	*	*
	15% Limo	*	*	*
	5% Arcilla	*	*	*
Nitrógeno (mg/kg)	0.03±0.003	0.08±0.09	0.19±0.14	0.27±0.02
Fósforo (nivel)	No	No	No	Bajo
Potasio (nivel)	Alto	Bajo	Bajo	Trazas
Materia orgánica (%)	4.30±0.042	8.96±0.18	13.75±1.00	17.95±1.13

* no determinado, debido a que los HTP alteran la determinación experimental.

El suelo testigo presenta una coloración gris claro que posiblemente indica la presencia de óxidos de sílice y una pequeña cantidad de materia orgánica [8]. La tonalidad del suelo se oscurece cuando hay una mayor cantidad de HTP. El pH indica la acidez o basicidad del suelo [8] [9]. El suelo testigo es neutro, mientras que los suelos con baja, media y alta concentración de HTP son medianamente alcalinos. La conductividad eléctrica indica que los suelos experimentales se clasifican con efectos despreciables de salinidad [10]. La densidad aparente muestra que los suelos experimentales son suelos orgánicos [9]. La densidad real es constante a lo largo del tiempo en un mismo estrato de suelo [10][11]. La densidad real medida del suelo testigo fue 2.4 g/cm³, (< 2.64 g/cm³ suelos minerales) y puede atribuirse a que el suelo tiene una textura arenosa [11].

Para el suelo testigo el porcentaje de porosidad es 61.51 %, según Reyes [10], la aireación del suelo a condiciones mayores al 50 % de porosidad es adecuado para el crecimiento biológico y microbiológico por lo que el suelo es favorable para la biorremediación. La humedad higroscópica para el suelo testigo es 3.248 % por su textura arenosa. La humedad capilar es 29.76 % y la humedad a capacidad de campo, comprende tanto la humedad higroscópica como la humedad capilar, cuyo valor es 33.01 %.

Con base en el triángulo de texturas, el suelo testigo es franco arenoso, y por su tipo posee partículas mayores a 20 μm que permiten la filtración de agua [8].

Para el suelo testigo la cantidad de nitrógeno posee un valor bajo, sin embargo, conforme aumenta la concentración de HTP se eleva el nitrógeno, probablemente debido a que los hidrocarburos contienen compuestos con nitrógeno [12] [13]. El suelo testigo presenta valores altos de potasio, a medida que la concentración de los hidrocarburos va en aumento, el valor del potasio disminuye, probablemente por la localización de los sitios de muestreo, que presentaron esos niveles. Para el fósforo, solo hubo cambios en el suelo de alta concentración de HTP, variando de una cantidad despreciable a un contenido bajo de este nutriente. Cabe mencionar que la técnica es cualitativa y susceptible de discrepancias entre los niveles “bajo” y “depreciable”.

La materia orgánica es un índice del nivel de fertilidad natural del suelo, se utiliza generalmente para referirse a los componentes de origen orgánico del suelo, incluyendo los tejidos animales y vegetales, los productos de su descomposición parcial y la biomasa del suelo [10] [14]. El suelo testigo se tiene un 4.3 % de materia orgánica, para el suelo con baja, media y alta concentración de HTP se tiene un 8.96, 13.75 y 17.95 %. De acuerdo con la NOM-021 en todos los casos el suelo tiene un alto contenido de materia orgánica.

4.2 Crecimiento microbiano

El crecimiento óptimo de la *Pseudomonas putida* en caldo nutritivo se logró a las 78 h, con una velocidad de crecimiento ($\mu=0.0062 \text{ h}^{-1}$). En caldo lactosado, el crecimiento óptimo se obtuvo a las 92 horas y con velocidad de crecimiento ($\mu=0.0049 \text{ h}^{-1}$). Por lo que, la solución utilizada en el suelo contaminado fue de *Pseudomonas putida* en caldo nutritivo y la inoculación del suelo se llevó a cabo a las 78 h de crecimiento de la bacteria.

4.3 Biorremediación a temperatura ambiente

La biodegradación a temperatura ambiente se realizó por bioaumentación, en la cual se probó la eficiencia de la bacteria *Pseudomonas putida* junto con la flora bacteriana del suelo para la degradación de los HTP. En la tabla 3 se muestran las concentraciones obtenidas después de 30, 45 y 60 días de tratamiento para los diferentes tipos de suelo.

Tabla 3. Concentraciones de HTP para cada tipo de suelo tratado por bioaumentación a diferentes tiempos

Nivel de contaminante	Tiempo de tratamiento (Días)			
	0	30	45	60
	Concentraciones (ppm)			
Alto	145 281.45± 2 036.98	78 083.48± 9 107.91	57 708.45± 11 763.76	29 238.69± 3 264.61
Medio	55 076.57± 71.78	50 238.92± 1 824.88	46853.61± 4 348.17	25 413.51± 3 169.85
Bajo	35 336.53± 1 470.47	28 756.71± 1 800 26	32 086.93± 1 384.81	15 681.78± 1 186.15

Hay una reducción en la concentración de HTP conforme transcurre el tiempo, donde a mayor concentración de contaminante, el proceso de degradación fue más efectivo, ya que cuando los HTP se incorporan al suelo, el número de microorganismos aumenta en función del incremento de sustrato orgánico disponible ^[15].

En la figura 3 se expone la eficiencia del proceso de biorremediación para los diferentes tipos de suelo, el mayor porcentaje de remoción se logró para el suelo con una alta concentración, después baja concentración y por último a media concentración de HTP. Resultados acordes con lo reportado por Windevoxxheld ^[16], con un 97.2 % de remoción de hidrocarburos empleando cultivos mixtos de bacterias para un periodo de 80 días.

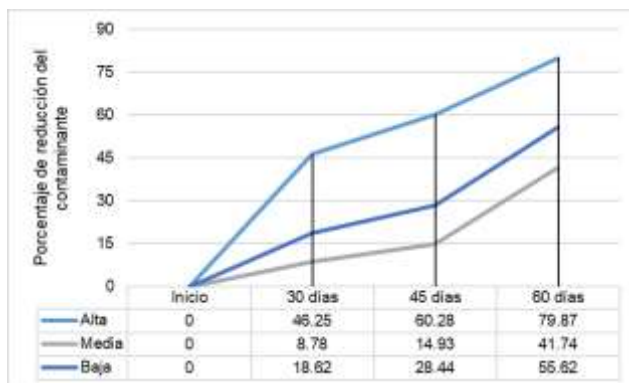


Figura 3. Eficiencia de la biorremediación en cada tipo de suelo

4.4 Biorremediación en condiciones de incubación

En la tabla 4 se reportan las concentraciones obtenidas para los diferentes tipos de suelo.

Tabla 4. Concentraciones de HTP para cada tipo de suelo tratado con la bacteria en incubación

Nivel de contaminante	Tiempo de tratamiento (días)	
	0	60
	Concentraciones (ppm)	
Alto	145 281.45±2 036.98	71 921.37±6 400.36
Medio	55 076.57±71.78	28 264.21±16 208.12
Bajo	35 336.53±1 470.47	26 160.51±426.93

Durante los 60 días del proceso, la solución bacteriana se evaporó constantemente, por lo que fue necesario suministrar agua estéril en repetidas ocasiones, esto es importante ya que, el contenido de humedad del suelo influye sobre la actividad microbiana, fijando la velocidad del proceso de biodegradación. El suelo con mayor concentración de hidrocarburos presenta el mayor porcentaje de degradación con un 50.55 % de remoción de HTP posiblemente porque la materia orgánica procedente del contaminante aumenta la actividad microbiana nativa en el suelo.

4.4 Biodegradación por atenuación natural

En la biodegradación por atenuación natural, el suelo fue analizado después de 60 días, considerando para la remediación únicamente los microorganismos nativos del suelo. En la tabla 5 se reportan las concentraciones obtenidas para los diferentes tipos de suelo.

Tabla 5. Concentraciones de HTP para cada tipo de suelo por biodegradación por atenuación natural.

Nivel de contaminante	Tiempo de tratamiento (días)	
	0	60
	Concentraciones (ppm)	
Alto	145 281.45±2 036.98	111 064.71±3 267.62
Medio	55 076.57±71.78	47 277.38±2 051.65
Bajo	35 336.53±1 470.47	23 424.54±1 095.93

De los resultados obtenidos se puede apreciar que el suelo con baja concentración de hidrocarburos presenta una mayor eficiencia de remoción en comparación con los otros suelos, con un porcentaje de remoción del 33.71 % en comparación con el 14.16 % y 23.55 % para el suelo con media y alta concentración de hidrocarburos.

En la tabla 6 se presentan los porcentajes de remoción para cada método después de 60 días. Para el proceso de bioaumentación con la bacteria, el porcentaje de remoción fue superior para el suelo de alta concentración seguido por baja y media concentración. En el caso de la biorremediación con incubación, el orden decreciente, de los porcentajes de remoción son para alta, media y baja concentración y para la biorremediación con atenuación natural los porcentajes son para baja, alta y media concentración. Hay que notar que ningún método permitió llegar a la concentración límite permitida para suelo industrial por la NOM-138, que es de 6 000 mg/kg de suelo.

Tabla 6. Porcentaje de remoción para cada método de remediación después de 60 días

Nivel de contaminante	Método de remediación		
	Biorremediación con bacteria	Biorremediación con incubación	Biorremediación atenuación natural
	Porcentajes de remoción de HTP		
Alto	79.87±2.25	50.50±4.41	23.55±2.25
Medio	41.74±5.76	48.68±0.35	14.16±3.73
Bajo	55.62±3.36	25.97±1.21	33.71±3.10

El proceso más eficiente se logró cuando se tenía una mayor concentración de contaminante, esto se debe a que cuando el hidrocarburo se incorpora al suelo, el número de microorganismos aumenta en función del incremento de sustrato orgánico disponible

[14]. Así como también del acoplamiento de esta capacidad con los aspectos físicos, químicos y geológicos del sitio a remediar [17].

Resultados similares fueron encontrados por Bento y colaboradores [18], que evaluaron tres tecnologías para la remediación de un suelo contaminado con la fracción pesada de HTP, bioaumentación, bioestimulación y atenuación natural. Después de 12 semanas, con la bioaumentación se logró un 72.7 % de remoción seguida de la atenuación natural con un 45.7 % de remoción y por último la bioestimulación con un 45.2 % de remoción.

La caracterización del suelo después de la biorrestauración, se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Caracterización final del suelo después de la biorrestauración.

	Suelo baja concentración			Suelo media concentración			Suelo alta concentración		
Biorremediación	Con bacteria	Incubación	Atenuación natural	Con bacteria	Incubación	Atenuación natural	Con bacteria	Incubación	Atenuación natural
Color	Grayish brown	Grayish brown	Grayish brown	Dark grayish brown	Grayish brown	Grayish brown	Dark brown	Dark grayish Brown	Very dark Grayish brown
	10YR5/2	10YR5/2	10YR5/2	10YR4/2	10YR5/2	10YR5/2	10YR3/3	10YR4/2	10YR3/2
pH (unidades)	7.21± 0.01	7.23± 0.01	7.33± 0.01	7.39± 0.01	7.32± 0.061	7.38± 0.004	6.72± 0.02	6.72± 0.02	7.39± 0.01
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0.054± 0.01	0.05± 0.02	0.059± 0.04	0.15± 0.01	0.16± 0.05	0.17± 0.015	0.158± 0.05	0.16± 0.08	0.23± 0.002
Nitrógeno (%)	0.02± 0.01	0.04± 0.09	0.05± 0.18	0.12± 0.02	0.13± 0.003	0.14± 0.09	0.15± 0.14	0.17± 0.02	0.18± 0.003
Fósforo (nivel)	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Potasio (nivel)	Trazas	Trazas	Bajo	Trazas	Bajo	Bajo	No	Trazas	Trazas
Materia orgánica (%)	3.75± 0.18	4.9± 1.00	5.35± 1.22	7.53± 1.12	8.04± 0.62	11.34± 0.03	8.41± 1.00	12.75± 0.45	10.45± 1.06

Hay una variación del color después del tratamiento, disminuyendo su tonalidad a medida que se reducía la cantidad de hidrocarburos, obteniéndose colores más parecidos al color inicial del suelo testigo. Los valores del pH variaron poco a excepción de los valores del suelo con una alta concentración de HTP que resultaron ligeramente ácidos, los demás valores permanecieron en el rango medianamente alcalinos según NOM-021. La conductividad eléctrica no cambio significativamente, ya que a pesar de que aumentó después de cada tratamiento, se mantuvieron como suelos con efectos despreciables de la salinidad (< 1.0 dS/m). El contenido de fósforo se mantiene como no detectable, mientras que para el potasio en los suelos con baja y mediana concentración de HTP para la atenuación natural e incubación es bajo. Para el nitrógeno su cantidad se redujo para todas las muestras de suelo, lo que significa un consumo de este nutriente en el proceso de degradación del contaminante. El suelo con baja concentración presenta una disminución de materia orgánica, mientras que para el suelo con media y alta concentración presentan un alto contenido de materia orgánica.

5. Conclusiones

Todos los tratamientos siguen un comportamiento muy parecido en cuanto a la remoción de los HTP, siendo el tratamiento más efectivo la bioaumentación con la bacteria, seguido de la biorremediación con incubación, dicho resultado puede deberse a que en el proceso de incubación no se contaba con la humedad suficiente.

Aunque se lograron buenos niveles de remoción de HTP, para alcanzar los límites permisibles que establece la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, es necesario seguir el tratamiento por un periodo más largo. Si se busca una mayor eficiencia en la degradación de HTP a menor plazo, existe la posibilidad de considerar un tren de tratamiento, como por ejemplo lavado-biorremediación. Un tratamiento de suelos a mayor escala es factible dado que la biorremediación con bacterias presentó hasta casi 80 % de eficiencia, se podría llevar el proceso en pilas con inoculación y aireación.

6. Bibliografía

1.- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012.

<https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-138-semarnat-ssa1-2012>

2.- IMCO. Centro de Investigación en Política Pública. (2024). PEMEX en la mira al Primer trimestre de 2024. [https://imco.org.mx/pemex-en-la-mira-al-primer-trimestre-de-2024/#:~:text=Este%20saldo%2C%20que%20equivale%20a,\(1.94%20billones%20de%20pesos\)](https://imco.org.mx/pemex-en-la-mira-al-primer-trimestre-de-2024/#:~:text=Este%20saldo%2C%20que%20equivale%20a,(1.94%20billones%20de%20pesos))

3.- PEMEX, Petróleos Mexicanos. (2022). Informe anual 2021. México. https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/65/1/2022-05-04-1/assets/documentos/PEMEX_Informe_Anual_2021.pdf

4.- FRTR (2016) Federal Remediation Technologies. Round Remediation Technologies Screening Matrix. Version 4.0. Treatment Perspectives. U. S. https://www.frtr.gov/matrix2/section3/sec3_int.html

5.- Pizarro-Tobías, P., Niqui J. L., Roca, A., Solano, J., Fernandez, M., Bastida, F. y Ramos, J. L. (2015). Field trial on removal of petroleum-hydrocarbon pollutants using a microbial consortium for bioremediation and rhizoremediation. Environmental microbiology reports. 7(1) 85-94.

6.- Pobleto Castro I, Becker J, Dohnt K, Dos Santos V. M., Wittmann C. (2012). Industrial biotechnology of *Pseudomonas putida* and species. Applied Microbiology and Biotechnology. 93 (6). 2279-2290.

7.- SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>

8.- Foth H. D. (1991). Fundamentals of soil science. Ed. John Wiley and Sons Inc.

- 9.- Jaramillo D. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.
- 10.- Reyes J. I. (1996). Fundamentos teórico-prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo. Parte 1. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. Libro de Texto. Manuales de Prácticas y Antologías. México.
- 11.- Pérez, C. G., Iturbe, A. R., Flores, S. R. M. (2009). Cambio en las propiedades físicas de un suelo contaminado con hidrocarburos debido a la aplicación de una tecnología de remediación, Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales. Investigación, desarrollo y práctica. 1.(1). <https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/14399>
- 12.- Philip, V., Bullin, J. A. y R. G. Anthony (1984) GPC characterization for assessing compatibility problems with heavy fuels oils. Fuel Process Technology 9. 189-201.
- 13.- Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., Mendoza-López, M., Sangabriel, W., Trejo-Aguilar, D., Cruz-Sánchez, J., López-Ortiz, C., y Delgadillo- Martínez J. (2007) Fitorremediación de un suelo contaminado con combustóleo usando Phaseolus coccineus y fertilización orgánica e inorgánica. Agrociencia 41 (8). 817-826.
- 14.- Jordán A. (2005) Manual de edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla. España.
- 15.- Pozzo A. M., Ferrari M, Calderón G. (29001). Diseño y ejecución de un plan de biotratamiento para residuos (cortes) de perforación de la actividad petrolera, por la metodología de biodegradación con bioaumentación. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 54. 41-48.
- 16.- Windevoxheld, R., Sánchez, N. y Bastardo H. (2011). Bioaumentación y sustancias húmicas en la biodegradación de hidrocarburos de petróleo. Revista Ingeniería UC. 18 (1) Uniersidad de Carabobo Valencia, Venezuela.
- 17.- Álvarez H. M. (2015). Biorremediación de ambientes contaminados con hidrocarburos: un proceso complejo que involucra múltiples variables. Química Viva. 12 (1). 18-25.
- 18.- Bento M. Fátima, Camargo A. O. Flavio, Okeke C. Benedict, Frankenberger T. William. (2005). Comparative biorremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. Bioresource Technology. 6 (9) 1049-1055.

Evaluación potencial ligninolítico de *Lentinus strigosus* sobre harina de endocarpo de vaina de mezquite para la biodegradación de colorantes comerciales

Camargo-Camargo, L. G.¹, Hernández-Díaz, A. ¹, Rangel-Jiménez, S.¹,
González- Escamilla, E.¹, Pérez-Cadena, R.^{1*}

¹Ingeniería en Energía, Universidad Polit cnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, ExHacienda de San Javier, C.P. 43860, Tolcayuca, Hidalgo, México.

213111796@upmh.edu.mx, 223111028@upmh.edu.mx, srangel@upmh.edu.mx,
egonzalez@upmh.edu.mx, *roperez@upmh.edu.mx

1. Resumen

En el presente trabajo se evaluó el crecimiento en placa de *L. strigosus* usando PDA y BHA como medio de cultivo suplementado con harina endocarpo de vaina de mezquite en 1, 3 y 5% p/v. Adicionalmente se evaluó la capacidad de biodecoloración en placa de colorantes comerciales suplementados con glucosa a 10 g/L y harina al 1% p/v. Se observó que en medio mineral BHA, el crecimiento del micelio con 3 y 5% p/v fue más abundante. Adicionalmente, se determinó que la velocidad de crecimiento con harina de endocarpo de vaina de mezquite en un 1%, tanto la velocidad de crecimiento como la velocidad de decoloración aumentaron significativamente en comparación con el medio suplementado con glucosa. Para los colorantes violeta azulado, azul marino y café tabaco la velocidad promedio fue de 1 cm/día, mientras que las velocidades de decoloración fueron de 0.63 cm/día para los tres colorantes.

2. Introducción

En la actualidad, la industria textil contribuye al deterioro ambiental, afectando de forma considerable los cuerpos de agua debido principalmente a que sus efluentes contienen colorantes y aditivos que pueden considerarse peligrosos^{1,2}. Aproximadamente, por una tonelada de productos textiles se generan de 80 a 200 mil litros de aguas residuales y, se estima que, durante el proceso de teñido se desperdicia hasta un 15% de los colorantes textiles, mismos que terminan en cuerpos hídricos, los cuales al poseer estructuras aromáticas complejas, resultan difíciles de degradar debido a que se mantienen estables en el ambiente³. Actualmente el número estimado de tintes y pigmentos generados en todo el mundo es superior a más de 100,000 tipos, produciéndose más de 700,000 toneladas de tintes comerciales al a o⁴. Estos colorantes comerciales encuentran su aplicación en diversas industrias como la textil, el cuero, la impresión de papel, la pintura, la alimentación, la cosmética, los pigmentos, el plástico y la industria farmac utica⁵.

Durante la búsqueda del tratamiento de los efluentes industriales para eliminar la presencia de colorantes se han empleado diferentes procesos físico-químicos, pero estos presentan inconvenientes como: costos elevados, el porcentaje de remoción limitado, entre otras^{6,7}. Procesos como la Biorremediación, muestran una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes ambientales y se presentan como una alternativa más amigable con el ambiente⁴. En los procesos de biorremediación de efluentes textiles, los microorganismos (hongos y bacterias), utilizan procesos como la degradación, acumulación y adsorpci n^{5,6}.

Actualmente, se sabe que los hongos de podredumbre blanca presentan una alta capacidad para degradar diversos colorantes y productos químicos sintéticos o naturales, gracias a mecanismos de adsorción o mecanismos enzimáticos ⁸. Los hongos de pudrición blanca se han estudiado durante casi tres décadas y se ha demostrado que nuevas especies decoloran varios tintes textiles debido a la actividad enzimática que poseen, los cuales degradan principalmente la lignina. Sin embargo, las capacidades de decoloración varían según la especie de hongo en función de las enzimas ligninolíticas producidas pudiendo ser Manganese Peroxidase (MnP) y Lignin peroxidase (LiP) y lacasas ⁴.

Hongos de podredumbre blanca tales como: *Hirschioporus larincinus*, *Inonotus hispidus*, *Phlebia tremellosa*, *Coriolus*, *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus*, *Lentinus polychrous*, y *Phanerochaete chrysosporium* han sido reportados con potencial para la decoloración de efluentes textiles ^{4,6}. Sin embargo, para la aplicación de estos hongos se deben de considerar factores que permitan alcanzar una abundante colonización, mantener su crecimiento por un periodo prolongado de tiempo y favorecer la producción de enzimas ligninolíticas ⁹. Diversos sustratos se han evaluado como potenciales para promover tanto el crecimiento como la producción de enzimas, entre ellas se encuentran: granos de maíz, paja de trigo, cáscara de trigo, salvado de trigo, bagazo de caña de azúcar, pulpa de remolacha azucarera, entre otros^{9,10}.

Actualmente, el mezquite (*Prosopis levigata*) se ha convertido en una valiosa fuente de recursos, ofreciendo una amplia gama de beneficios aprovechados por diversas comunidades en México destacando entre sus componentes, la legumbre del mezquite ¹¹. El contenido promedio en su composición es: celulosa con un 13.5 a 21.8%, hemicelulosa de 6.4 a 12.1 % y lignina de 5.6 a 13.9%; además, la digestibilidad in vitro de la materia seca es de 63.2 a 39.8% ¹². Esta legumbre tiene amplias aplicaciones alimenticias y de ganado ^{13,14}. Por tanto, al final de su aprovechamiento genera residuos, los cuales pueden ser aprovechados en nuevos procesos.

En el presente trabajo se evaluó el potencial ligninolítico en placa del hongo *Lentinus strigosus* suplementado con harina de endocarpo de vaina de mezquite para la degradación de colorantes textiles comerciales.

3. Metodología

3.1. Microorganismo y condiciones de cultivo

La cepa del hongo *L. strigosus*, fue proporcionada por la Universidad Politécnica de Pachuca. Esta se sembró en placas de Petri con agar papa dextrosa (PDA), y se incubó por 5 días a 35°C posteriormente se almacenaron en refrigeración hasta su uso. En tubos inclinados con PDA y en tubos con endocarpo de vaina de mezquite hidratada al 85%, la cepa fue sembrada e incubada durante 7 días a 30°C como medios de conservación.

3.2. Evaluación del crecimiento de L. strigosus en medio sólido

Para evaluar el crecimiento del hongo *L. strigosus* se utilizaron dos medios de cultivo: agar papa dextrosa (PDA) y el medio mineral Bushnell Haas Agar (BHA) modificado cuya composición fue ¹⁵: 0.2 g de $MgSO_4$, 0.02 g de $NaNO_3$, 1 g de K_2HPO_4 , 1 g de NH_4Cl , 1 g de $(NH_4)_2HPO_4$ y 20 g de agar-agar. Ambos medios fueron suplementados con 0%, 1%, 3% y 5% p/v de harina de endocarpo de vaina de mezquite. Las placas fueron sembradas con micelio de 0.5 cm² y posteriormente fueron incubadas a 35°C verificando el crecimiento diariamente.

3.3. Determinación de la capacidad de decoloración en placa.

Para la determinación de la capacidad de decoloración, se prepararon placas de Petri con PDA y el medio mineral BHA, suplementado con colorantes textiles comerciales violeta azulado, azul marino, café tabaco y rojo granada a una relación de 0.5% p/v. Las placas fueron suplementadas con glucosa a 10 g/L y harina de endocarpo de vaina de mezquite al 1% p/v como fuente de carbono. Para evitar el crecimiento de bacterias, a las placas se le agregó gentamicina a una relación de 40 µl/ml, posteriormente fueron incubados a 35°C por siete días. Todos los ensayos se hicieron por triplicado.

4. Resultados y discusión

4.1. Evaluación de crecimiento

Al evaluar el crecimiento en placa, se comparó el crecimiento del micelio de *L. strigosus* tanto en PDA como en BHA, ambos suplementados con harina de endocarpo de vaina de mezquite (tabla 1). Los resultados mostraron que la morfología del micelio creciendo sobre el medio sólido fue diferente a medida que la cantidad de harina suplementada aumentó. Mientras que en las placas con medio BHA, se observó que a medida que la cantidad de harina aumentó, tanto la abundancia del micelio como el crecimiento radial incremento significativamente. Se ha reportado que tanto para el crecimiento microbiano como para los procesos de biodecoloración deben de ser considerados tanto factores ambientales como nutricionales ¹⁶. Al respecto, se ha observado que la relación C/N tiene un efecto sobre la producción de enzimas como en el caso de la enzima MnP que en *P. chrysosporium*, esta enzima se expresa en condiciones de limitación de nitrógeno ⁹.

Tabla 1. Efecto de harina de endocarpo de vaina de mezquite sobre el crecimiento de *L. strigosus*.

Medio	0% p/v	1% p/v	3% p/v	5% p/v
PDA				



Por lo tanto, se observó que al aumentar de 1 a 3% p/v la cantidad de harina endocarpo de vaina de mezquite, el crecimiento en el medio BHA aumentó significativamente, mientras que con un 5% p/v el crecimiento en placa fue el más abundante (tabla 1). Este comportamiento puede deberse a que la vaina de mezquite tiene relativamente, un alto valor nutricional, puesto que contiene alrededor del 10-15% de proteína cruda, 20-30% de fibra cruda y 16-41% de azúcares totales (75% de sacarosa) además de compuestos fenólicos (1.2%) y cenizas (3.6%) ¹⁷.

Todos estos componentes fueron aprovechados por el hongo debido a su capacidad de producción de enzimas extracelulares permitiendo el crecimiento del micelio. Se ha reportado que en la degradación enzimática de la lignina intervienen una serie de reacciones inespecíficas que originan la formación de radicales libres en el biopolímero y dan como resultado la desestabilización de los enlaces y finalmente la ruptura de la macromolécula ⁹.

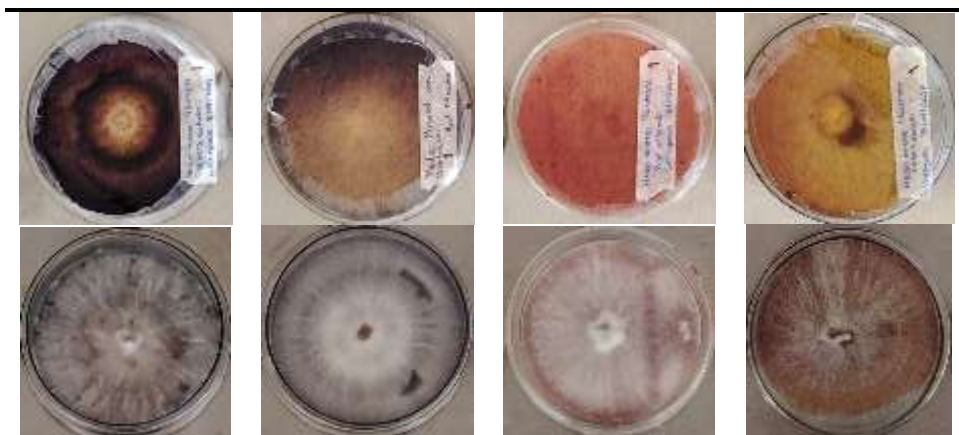
4.2 Evaluación del crecimiento y decoloración en placa.

Cuatro diferentes colorantes textiles comerciales se evaluaron en su capacidad para ser bio-decolorados por *L. strigosus* en placa, bajo condiciones de medio mineral limitando la fuente de carbono con glucosa y harina de endocarpo de vaina de mezquite. En los resultados obtenidos, se observó que tanto el crecimiento micelial como la capacidad de decoloración aumentó debido a la presencia de la harina de endocarpo de vaina de mezquite en comparación con las placas suplementadas con glucosa (tabla 2 y 3).

Al respecto, se sabe que el proceso de biodegradación juega un papel importante en la decoloración de los tintes, debido a que los hongos de pudrición blanca tienen la capacidad producir enzimas ligninolíticas para mineralizar estos componentes ⁶. Sin embargo, las contribuciones relativas de las enzimas lacasa, MnP y LiP a la decoloración de los tintes pueden ser diferentes para cada hongo⁴.

Tabla 2. Evaluación del efecto de la capacidad de decoloración de *L. strigosus* suplementado con harina al 3% de endocarpo de vaina de mezquite.

Fuente de carbono: Harina de endocarpo de vaina de mezquite			
Azul marino	Violeta azulado	Rojo granada	Café tabaco



Por otro lado, los resultados de decoloración en placa mostraron que la velocidad de crecimiento fue mayor usando la harina de endocarpo de vaina de mezquite como co-sustrato en comparación con la glucosa. Se observó que en medio BHA suplementado con glucosa, los colorantes textiles violeta azulado y café tabaco *L. strigosus* mostró una velocidad de crecimiento promedio de 0.4 cm/día y una velocidad de decoloración de 0.02 y 0.55 cm/día respectivamente (figura 1a). Mientras que con el color azul marino se observó un crecimiento micelial mayor, con una velocidad de crecimiento de 0.72 cm/día y 0.19 cm/día en la velocidad de decoloración.

Tabla 3. Evaluación del efecto de la capacidad de decoloración de *L. strigosus* suplementado con glucosa.

Fuente de carbono: Glucosa			
Azul marino	Violeta azulado	Rojo granada	Café tabaco
			
			

Se ha reportado que los basidiomicetos se consideran los descomponedores más eficientes de la biomasa de plantas muertas en muchos hábitats debido al sistema enzimático extracelular específico que poseen ⁷, al mismo tiempo que pueden ser capaces de degradar diferentes compuestos xenobióticos, incluidos los tintes sintéticos de tipo azoicos, heterocíclicos, reactivos y poliméricos ¹⁸.

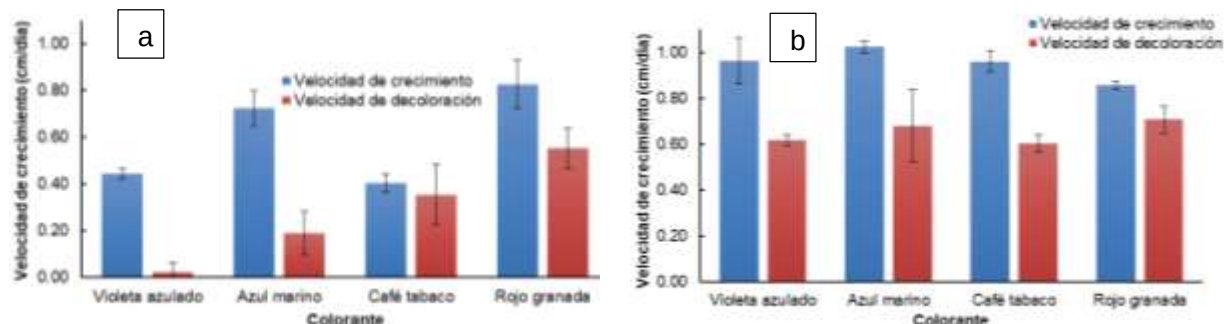


Figura 1. Comparación de la velocidad de crecimiento y velocidad de decoloración de *L. strigosus* en placa suplementado, a) glucosa, b) harina endocarpo vaina de mezquite.

Por otro lado, al adicionar al medio de cultivo la harina de endocarpo de vaina de mezquite en un 1% se observó que las velocidades de crecimiento y decoloración aumentaron significativamente, de tal forma que para los colorantes violeta azulado, azul marino y café tabaco la velocidad promedio fue de 1 cm/día, mientras que las velocidades de decoloración fueron de 0.63 cm/día para los tres colorantes (figura 1b).

Por otro lado, con el colorante rojo granada la velocidad tanto en el crecimiento radial como la velocidad de decoloración fue similar a los tratamientos con glucosa siendo de 0.83 y 0.6 cm/día respectivamente. En resultados similares se observó que de los hongos *Phanerochaete chrysosporium*, *Phanerochaete sordida*, *Polyporus ciliatus*, *Phlebia radiata*, *Lentinus tigrinus*, *Stereum hirsutum*, *Anthracoophyllum discolor* mostraron decoloración en placa por la acción de al menos una enzima ligninolítica, con velocidades de entre 1 a 3 cm/día y velocidades de decoloración de entre 0.75 a 1cm/día ³.

En placa, se observó que el porcentaje promedio de decoloración fue del 82% para el medio suplementado con harina de endocarpo de vaina de mezquite, mientras que, para el medio suplementado con glucosa, se encontró un 83.7% de decoloración en con el rojo granada. Adicionalmente se encontró que el porcentaje de remoción de colorante disminuyó con café tabaco, azul marino y violeta azulado después de 6 días de ensayo (figura 2).

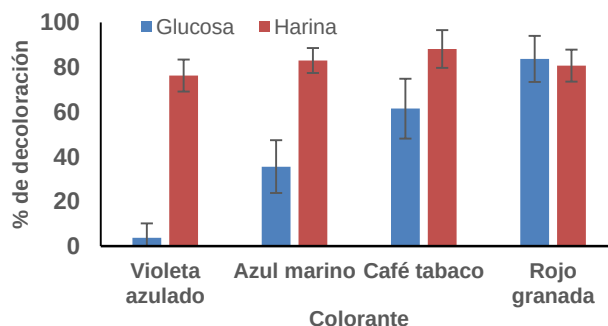


Figura 2. Porcentaje de decoloración en placa suplementado con harina de endocarpo de vaina de mezquite.

Se ha reportado que especies de *Lentinus sp* producen enzimas peroxidadas (MnP y LiP) al inicio del crecimiento fúngico y a medida que el crecimiento continua, aumenta la actividad enzimática lacasa, encontrándose cantidades de actividad enzimática altas a partir de la tercera semana de cultivo ¹⁸. En contraste, se ha reportado que *Pleurotus*

pulmonaris biodegrada el colorante azul brillante en un 99.14%, bajo una relación de carbono:nitrógeno (C:N) de 20:1, mientras que en combinación con *Pleurotus ostreatus* se obtuvo una decoloración del 92% en 10 días¹⁹. Estos resultados fueron similares a los observados en este trabajo donde la decoloración del colorante azul marino, violeta azulado y café tabaco aumentó su velocidad a partir del cuarto día de crecimiento y al sexto día se alcanzó el máximo porcentaje de decoloración.

5. Conclusión

El medio mineral BHA suplementado en un 3 y 5% p/v de harina de endocarpo de vaina de mezquite permitió el crecimiento de *L. strigosus* en placa. Adicionalmente, la decoloración en placa fue mayor con harina al 3% p/v a una velocidad de crecimiento de 1 cm/día. Por lo tanto, el uso de la harina potenció tanto el crecimiento como la decoloración obteniéndose hasta un 82% en la decoloración con los colorantes comerciales utilizados.

El medio mineral BHA suplementado en un 3 y 5% p/v de harina de endocarpo de vaina de mezquite permitió el crecimiento de *L. strigosus* en placa. Adicionalmente, la decoloración fue de hasta un 82% en el medio mineral suplementado con harina al 3% p/v a una velocidad de crecimiento de 1 cm/día. Por lo tanto, el uso de la harina potenció tanto el crecimiento como la decoloración con los colorantes comerciales utilizados.

6. Bibliografía

1. Pérez-Cadena, R. *et al.* Biological decolorization of Amaranth dye with *Trametes polyzona* in an airlift reactor under three airflow regimes. *Heliyon* **6**, e05857 (2020).
2. Caceido Daza, E., De Alba Ávila, R. & Flores Negrete, L. G. Efectos Contaminantes De La Industria Textil. 1–5 (2019).
3. Cardona, M., Osorio, J. & Quintero, J. Degradación de colorantes industriales con hongos ligninolíticos. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* 27–37 (2009).
4. Gnanadoss, J. J. & Jebapriya, G. R. Bioremediation of Textile Dye Using White Rot Fungi: a Review. *Rev. Int J Cur Res Rev* 5 (2013).
5. Sudarshan, S. *et al.* Impact of textile dyes on human health and bioremediation of textile industry effluent using microorganisms: current status and future prospects. *J. Appl. Microbiol.* **134**, 1–23 (2023).
6. Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. & Nigam, P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresour. Technol.* **77**, 247–255 (2001).
7. Eichlerová, I. & Baldrian, P. Ligninolytic Enzyme Production and Decolorization Capacity of Synthetic Dyes by Saprotrophic White Rot, Brown Rot, and Litter Decomposing Basidiomycetes. *J. Fungi* **6**, 301 (2020).
8. Knapp, J. S., Newby, P. S. & Reece, L. P. Decolorization of dyes by wood-rotting basidiomycete fungi. *Enzyme Microb. Technol.* **17**, 664–668 (1995).

9. Quintero, J. C., Feijoo, G. & Lema, J. M. Producción de enzimas ligninolíticas con hongos basidiomicetos cultivados sobre materiales lignocelulósicos. *Vitae, Rev. la Fac. Química Farm.* **13**, 61–67 (2006).
10. Hernández-Teyssier, E. L., Anducho-Reyes, M. A., Díaz-Godínez, G. & Tellez-Jurado, A. Modelado del crecimiento durante la detoxificación de residuos de café por hongos filamentosos. *Ecosistemas y Recur. Agropecu.* **10**, (2023).
11. López-franco, Y., Goycoolea, F., Valdez, M. & Calderón, A. Goma de mezquite: Una Alternativa De Uso Industrial. *Interciencia* **31**, 183–189 (2006).
12. Esqueda Coronado, M. H., Chaves Silva, A. H. & Gutierrez Aldrete, J. L. Contenido, fluctuación y valor nutricional del mezquite (*Prosopis glandulosa*) en la dieta de bovinos duante la época de sequía. *Técnica Pecu. en México* **25**, 309–314 (1987).
13. Luna Castañón, R. Variabilidad morfológica y genética del mezquite *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) en el estado de Aguascalientes. vol. NA (2014).
14. Campos, E. Aprovechamiento de las vainas de mezquite para la producción de alcohol, empleando hongos en la hidrólisis de compuestos lignocelulósicos. (UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, 2017).
15. Muthukumaran, P. *et al.* Biodecolorization of textile reactive dyes by *Penicillium chrysosporium* and *Penicillium simplicissimum* -A comparative study . *Res. J. Eng. Technol.* **8**, 33 (2017).
16. Nosheen, S., Nawaz, R., Arshad, M. & Jamil, A. Accelerated biodecolorization of reactive dyes with added nitrogen and carbon sources. *Int. J. Agric. Biol.* **12**, 426–430 (2010).
17. Gallegos-Infante, J. A., Rocha-Guzman, N. E., Gonzalez-Laredo, R. F. & Garcia-Casas, M. A. Thermal processing effect on the antioxidant capacity of pinole from mesquite pods (*Prosopis laevigata*). *CYTA - J. Food* **11**, 162–170 (2013).
18. Gomes, E. *et al.* Ligninases production by Basidiomycetes strains on lignocellulosic agricultural residues and their application in the decolorization of synthetic dyes. *Brazilian J. Microbiol.* **40**, 31–39 (2009).
19. Rojas, J. & Hormaza, A. Evaluación De La Biodegradación Del Colorante Azul Brillante Utilizando Hongos De La Podredumbre Blanca Y Sus Consorcios. *U.D.C.A Actual. Divulg. Científica* **19**, 179–187 (2015).

Fitoestabilización de jales mineros con cobertura de pastos

Malagón, C. C.,¹ Beltrán, V. M.¹, Sotelo, N. P. X.¹ Labastida N. I.¹, Quintana, D. B.¹, Nuño, L. L.¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.

Av. San Pablo 420. Col. Nueva el Rosario. Alcaldía Azcapotzalco C.P. 02128. CDMX

caro.malagon@outlook.com; mbv@azc.uam.mx; perlaso@azc.uam.mx;
iln@azc.uam.mx; mbgd@azc.uam.mx; lnl@azc.uam.mx

1.- Resumen

La minería es una actividad económica importante en México, contribuye con el 2.05 % del producto interno bruto (PIB) nacional ^[1], el país es uno de los principales productores mundiales de plata, cobre, zinc y oro. La minería enfrenta el desafío de la disposición de jales, que son un residuo peligroso por su alto contenido de elementos potencialmente tóxicos y que por transporte eólico y pluvial pueden contaminar lugares aledaños. Se evaluó el crecimiento de una mezcla de pastos sobre jales aplicando la técnica de bioestimulación con un 15 % de lombricomposta, en rizotrones con condiciones de invernadero. El pasto resultó una opción viable para generar una cobertura vegetal para mitigar la contaminación de suelos debida a jales mineros. Al comparar el crecimiento del pasto con un testigo de suelo sin contaminantes, los resultados mostraron que incluso la longitud de la parte aérea del pasto que creció en jales fue mayor en un 9 % pero existió una inhibición de 46 % en la longitud de la raíz.

2.- Introducción

La minería es la actividad que se dedica a exploración, explotación y aprovechamiento de los recursos minerales obtenidos de la tierra con el fin de su comercialización. Estos minerales se emplean para la fabricación de una amplia variedad de productos, incluidos automóviles, teléfonos, entre otros. México es uno de los principales productores mundiales de plata, cobre, zinc y oro ^[2,3]. Para el año 2020 había 124 operaciones minero-metalúrgicas en el país, de las cuales 53 son minas subterráneas, 34 son minas a cielo abierto, 6 mixtas y 31 plantas ^[4].

En el proceso productivo de la minería se genera una gran cantidad de residuos, uno de ellos son los jales, que son fuente de contaminación por su elevado contenido de metaloides como arsénico y metales pesados como el hierro, cadmio, plomo o zinc. Éstos son depositados y acumulados en pilas llamadas presas de jales ^[5] y algunas afectaciones pueden ser su dispersión al aire, agua y suelos ^[2].

Diversas investigaciones han mostrado que existen elevadas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), selenio (Se), plomo (Pb), zinc (Zn), entre otros, en los jales. Estos EPT contaminan el agua y el suelo por la generación y dispersión de polvos, y las aguas subterráneas y superficiales por infiltración o deposición de éstos ya sea directamente o a través de escorrentías ^[6,7].

Específicamente, los jales del municipio de Zimapán en el estado de Hidalgo, han mostrado concentraciones de EPT altos, que contaminan suelos cercanos. En algunos

casos presentan alto contenido de As y Pb que sobrepasan los límites recomendados para el uso residencial o industrial de suelos. Esta situación es indeseable, no sólo para el ecosistema, sino también para la salud humana, ya que los contaminantes pueden ser transferidos por la ingesta de alimentos y algunos están clasificados como carcinógenos, teratógenos o mutágenos [8,9,10].

Las propiedades físicas y químicas de los jales impiden el crecimiento vegetal; sin embargo, algunas especies son capaces de sobrevivir e incluso prosperar en suelos contaminados.

Para controlar y restaurar esta fuente de contaminación se estudió la fitoestabilización de jales con una cobertura vegetal, bioestimulando el crecimiento de una mezcla de pasto, a través del uso de lombricomposta, para promover la actividad de microorganismos autóctonos.

El crecimiento de especies vegetales sobre los jales expuestos a la intemperie, disminuyen la contaminación, funcionan como una cubierta evitando el transporte aéreo de EPT y su dispersión a cuerpos de agua. Se ha demostrado que la mezcla de pastos (*Festuca rubra*, *Cynodon catylon*, *Lolium multiflorum* y *Pennisetum*) presentan una tolerancia aceptable a la presencia de jales altamente intemperizados [7,11,12,13].

3.- Condiciones experimentales

El proceso experimental empleado se presenta en la figura 1.

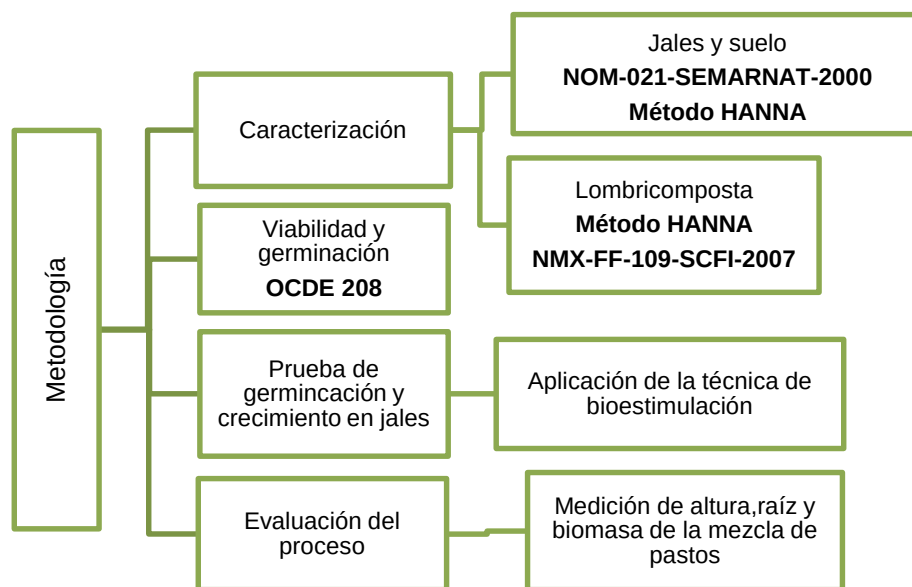


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso experimental

3.1 Obtención de muestras

Para llevar a cabo las pruebas de bioestimulación se utilizó suelo para jardinería marca Vigoro®, que contiene tierra negra, tierra de hoja y tierra de montaña, como suelo testigo. El abono orgánico consistió en lombricomposta proveniente del módulo de lombricomposteo del Área de Tecnologías Sustentables del Departamento de Energía de la UAM- Azcapotzalco. Los jales no intemperizados (que no presentan procesos de oxidación) provienen de la región minera de Zimapán, Hidalgo.

3.2 Caracterización fisicoquímica del suelo, jales y lombricomposta

Se caracterizaron con base en la norma NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Se prepararon las muestras y se obtuvieron los siguientes parámetros ^[14]:

- Color
- Conductividad eléctrica
- Contenido de materia orgánica
- Densidad aparente
- Densidad real
- Textura
- pH
- Porosidad
- Nutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio. Se utilizó el método HANNA (Test kit HI 3896®)

La lombricomposta también se caracterizó de acuerdo con la norma NMX-FF-109-SCFI-2007, Humus de lombriz (lombricomposta), Especificaciones y Métodos de prueba ^[15], con los siguientes parámetros:

- Conductividad eléctrica
- Contenido de materia orgánica
- Nitrógeno inorgánico
- Porcentaje de humedad
- Carbono orgánico

3.3 Pruebas de viabilidad de la mezcla de pastos

Se determinó la viabilidad de las semillas con base en la guía de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico-OCDE 208 Guidelines for the testing of chemicals. Dicha prueba establece que, si más del 70 % de las semillas emergen, éstas son viables para la experimentación ^[16].

Se empleó una mezcla de pastos GERMINAL® (*Festuca rubra*, *Cynodon catylon*, *Lolium multiflorum* y *Pennisetum*) y se procedió a colocar las semillas en un almácigo con 10 réplicas (figura 2). En cada uno se sembraron 10 semillas en un ambiente controlado y monitoreado. Se regaron con agua potable y transcurridos 14 días, se determinó el porcentaje de semillas germinadas.



Figura 2. Almácigos utilizados en la prueba de viabilidad

Al finalizar la prueba de viabilidad se obtuvo el 70 % de germinación transcurridos 7 días. Con base en el protocolo OECD 208, las semillas se consideraron viables y aptas para el experimento (figura 3).



Figura 3. Prueba de viabilidad para mezcla de pastos

3.4 Pruebas de germinación de la mezcla de pastos

Las pruebas de germinación y crecimiento se llevaron a cabo en rizotrones cubiertos con un plástico obscuro en la cara traslúcida, para promover el crecimiento de las raíces sobre la pared ya que se esconden de la luz y por otro lado para favorecer el crecimiento microbiano. Cada rizotrón se mantuvo con un ángulo de 30° de inclinación con respecto a la vertical, para asegurar el crecimiento de la raíz sobre la cara trasera debido al geotropismo ^[17] (figura 4).



Figura 4. Rizotrones utilizados en la parte experimental

El experimento tuvo una duración de 19 días, contabilizados a partir de que el 50 % de las semillas germinaron; el número de días recomendados por la OECD varía de 14 a 21 días. A cada rizotrófono se le agregó 1 g de semillas de mezcla de pastos y se tuvieron 5 réplicas ^[16].

La primera etapa experimental fue empleando rizotrones con un control y una técnica de biorrestauración cada uno por quintuplicado, teniendo un total de 10 rizotrones. El control positivo contenía 85 % de suelo para jardinería Vigoro® y 15 % de lombricomposta; y la técnica de biorrestauración, 85 % jales no intemperizados y 15 % de lombricomposta.

3.5 Monitoreo del experimento

Con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 se determinó el pH al final del tratamiento. Se monitoreó la temperatura y humedad de la experimentación en el invernadero con sensores Lascar EasyLog USB Data Logger®. Este dispositivo midió diariamente y en un periodo de cada seis horas; su rango de temperatura abarca -35 a 80°C con una precisión de ± 0.5 °C y la humedad en el intervalo de 0 a 100 % HR con precisión de ± 3 %. Los rizotrones se regaron diariamente, agregando de 10-15 mL de agua potable a cada uno y que garantizaba un contenido de agua a capacidad de campo de entre 80 y 100 %.

4.- Resultados y discusión

4.1 Caracterización fisicoquímica de jales, suelo y lombricomposta

En la tabla 1 se muestra la caracterización fisicoquímica del suelo de jardinería Vigoro® y jales no intemperizados.

Tabla 1. Resultados de la caracterización fisicoquímica de suelos y jales

Parámetros		Suelo Vigoro	Jales no intemperizados
Color		7.5YR2.5/2	5Y6/1
		Café muy oscuro	Gris
Conductividad eléctrica (dS/m)		2.4±0.05	1.95±0.09
Contenido de materia orgánica (%)		5.6±0.1	1.34±0.13
Densidad aparente (g/cm ³)		1.15±0.05	1.02±0.1
Densidad real (g/cm ³)		2.4±0.2	2.13±1.2
Textura	% arena	25	94
	% limo	45	5
	% arcilla	35	1
Fósforo		Trazas	Medio
Nitrógeno		No detectable	Alto
Potasio		Alto	Trazas
pH(unidades)		5.62±0.01	7.43±0.12
Porosidad (%)		52.08±0.91	51.38±1.13

El suelo para jardinería presenta tonalidades de café que indica la existencia de componentes orgánicos ^[18]. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, la conductividad eléctrica mide la salinidad, el suelo para jardinería es moderadamente salino, y los jales no intemperizados ligeramente salinos. El suelo también se clasifica en función de la cantidad de materia orgánica, un alto contenido indica actividad microbiana, el suelo para jardinería presentó un contenido alto, y los jales bajo.

La densidad aparente está influida por la textura y la cantidad de materia orgánica.

Los jales se clasificaron por el tamaño de partícula como arenosos y el suelo para jardinería se puede considerar un suelo arcilloso que permite la retención de agua y nutrientes. Uno de los nutrientes más importantes es el nitrógeno que fortalece la raíz y la parte aérea, los jales presentaron alto contenido, al igual que el fósforo y sólo trazas de potasio.

El suelo para jardinería y los jales no intemperizados muestran un pH óptimo para el desarrollo de especies vegetales en conjunción con la materia orgánica y los nutrientes ^[19].

El suelo y los jales presentan un valor de porosidad que permite una buena aireación y permeabilidad del agua.

En la tabla 2 se muestra la caracterización fisicoquímica de la lombricomposta realizada con base en la norma NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta), Especificaciones y Métodos de prueba.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de la lombricomposta

Parámetros	Lombricomposta
Conductividad eléctrica (dS/m)	18.66±0.58
Contenido de materia orgánica %	58.63±0.94
Fósforo	Alto
Nitrógeno	Medio
Potasio	Medio
pH (unidades)	8.18±0.005
Porcentaje de humedad %	62.51±2.18
Nitrógeno inorgánico %	5.65±0.16
Carbono %	32.57±0.94
Fitotoxicidad %	62.36±11.54

Se observa que algunos parámetros de la norma NMX-FF-109-SCFI-2007 no se cumplen, ya que ésta especifica un contenido de materia orgánica de 20 a 50 %, nitrógeno 1 a 4 % y una conductividad menor a 4 dS/m. Los resultados obtenidos exceden las especificaciones de la norma, de igual manera se observa fitotoxicidad, lo que según la norma PROY-NADF-020-AMBT-2011^[20] la clasifica como moderadamente tóxica, esto sugiere que podría no ser apta para obtener cultivos de buena calidad o que puede incidir en el desarrollo de los microorganismos.

4.2 Resultados de germinación y crecimiento

En la figura 5 se presentan los resultados de crecimiento longitudinal para la raíz y la parte aérea de los pastos sembrados en suelos de jardinería con lombricomposta (SJ+L) y jales no intemperizados con lombricomposta (JNI+L).

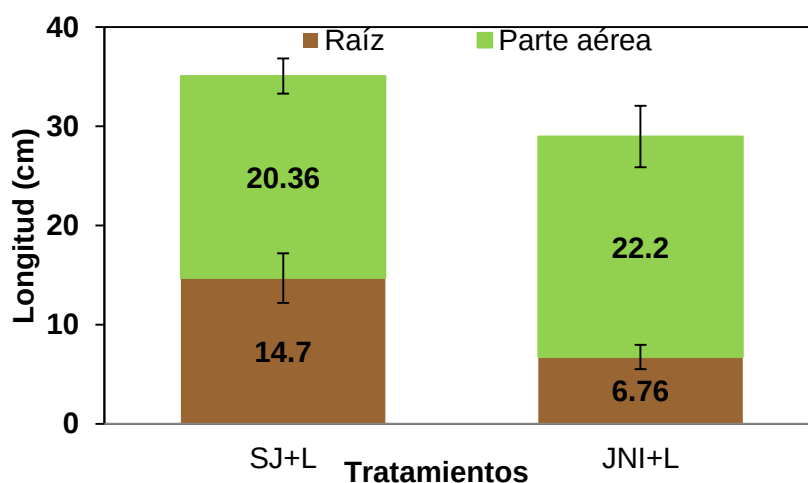


Figura 5. Crecimiento longitudinal para la raíz y la parte aérea de los tratamientos SJ+L (suelo de jardinería con lombricomposta) y JN+L (jales no intemperizados con lombricomposta)

La longitud del pasto que creció en jales fue mayor en un 9 % respecto al testigo, pero la longitud de la raíz 45.98 % menor que el testigo de suelo de jardinería. La raíz fue capaz de desarrollarse en los jales, a pesar de la presencia de metales pesados, además las características fisicoquímicas de los jales son desfavorables comparativamente que el suelo de jardinería. Cervantes y colaboradores (2011) ^[21], demostraron que la presencia de metales pesados reduce el crecimiento de la raíz principal con un mayor desarrollo de raíces secundarias en la especie vegetal *Nicotiana tabacum* L.

La parte aérea de la mezcla de pastos presentó mayor crecimiento para SJ+L. Entre los dos tratamientos (SJ+L y JN+L) existe una diferencia de 8.28 % en la longitud, que es una diferencia relativamente baja. El pH y el alto contenido de nitrógeno favoreció el crecimiento de la mezcla de pastos en los jales. El suelo para jardinería tiene un pH moderadamente ácido y los jales no intemperizados un pH medianamente alcalino. Un pH óptimo para pasto se encuentra entre 6 y 8 ^[22].

En la figura 6, se presenta la biomasa húmeda de la raíz y la parte aérea del suelo para jardinería con lombricomposta (SJ+L) y jales no intemperizados con lombricomposta (JN+L).

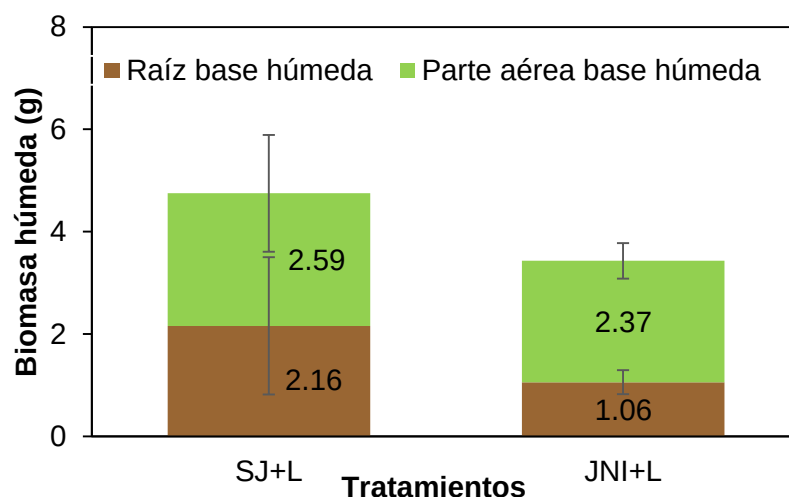


Figura 6. Biomasa húmeda para la raíz y la parte aérea de los tratamientos SJ+L (suelo de jardinería con lombricomposta) y JN+L (jales no intemperizados con lombricomposta)

Si el análisis se realiza a partir de la biomasa, la raíz de los pastos que crecieron en jales no intemperizados con lombricomposta es 49.7 % menor que en el suelo de jardinería

con lombricomposta. En este último, se presentó mayor biomasa en la raíz porque en un suelo con mayor cantidad de materia orgánica se desarrollan principalmente las raíces primarias que tienen un mayor grosor y longitud, en comparación con los jales en donde crecen principalmente raíces secundarias y terciarias generando un menor volumen.

En lo que se refiere a la parte aérea, la biomasa generada en los jales no intemperizados con lombricomposta fue 8.49 % menor que en el suelo para jardinería con lombricomposta. En el suelo para jardinería el nitrógeno no fue detectado; sin embargo, la lombricomposta pudo haber aportado este elemento, además de que el contenido de materia orgánica pudo haber influido en la biomasa generada ^[23]. La alcalinidad y el alto contenido de nitrógeno de los jales no intemperizados favorecen el crecimiento de los pastos; sin embargo, aunque la longitud es competitiva, el grosor es menor probablemente por la presencia de metales pesados en los jales.

5.- Conclusiones

La evaluación del crecimiento de pastos en jales con lombricomposta evidenció una longitud y generación de biomasa competitiva comparativamente con los resultados en un suelo sin contaminantes. Lo anterior demuestra el potencial de la especie vegetal pasto como cobertura vegetal, cuando existe una bioestimulación, lo que evitaría una dispersión de polvos de jales y por ende de contaminantes a lugares circundantes a las presas de jales.

La raíz es capaz de desarrollarse en los jales no intemperizados a pesar de la probable presencia de metales pesados, aunque se evidenció un efecto inhibitor en la biomasa. La germinación y crecimiento de pastos en jales con metales pesados sugieren una alternativa para utilizarse como cubierta vegetal en presas para impedir la intemperización de los jales disminuyendo así la contaminación ambiental que provocan. Es factible la aplicación de esta tecnología en campo siempre y cuando se garanticen las condiciones óptimas para su crecimiento y se resguarde la zona para evitar el consumo por mamíferos y la introducción a la cadena trófica. Una limitante de esta investigación es el tiempo de evaluación, es importante determinar los efectos en el crecimiento vegetal en tiempos prolongados y comprobar la supervivencia del pasto por la presencia de metales pesados. En este artículo no se presentan los resultados de la concentración de metales pesados, pero se comprobó que el pasto es tolerante a los mismos.

6.- Bibliografía

[1] SE, Secretaria de economía (2024). Minería <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>

[2] Volke, T. & Velasco J. (2003). Biodegradación de hidrocarburos de petróleo en suelos intemperizados mediante composteo. Dirección de Investigación en Residuos y Proyectos Regionales. 33. <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/composteo2003.pdf>

[3] González, M. C., Pérez, J. y Carrillo, R. (2005). Niveles de contaminación de los suelos y las plantas. El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. Colegio de postgraduados pp.161. Estado de México. México

[4] CEFP (2024). Situación Actual de la Industria Minera en México 2020-2023. Cámara de Diputados. LXV Legislatura.

<https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/documento/2024/cefp0132024.pdf>

[5] Labastida I., Lázaro, I., Celis, L. B., Razo-Flores, E., Cruz R. y Briones-Gallardo, R. (2013). Kinetic of biogenic sulfide production for microbial consortia isolated from soils with different bioaccessible concentrations of lead. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 10. 827-836. <http://doi.org/10.1007/s13762-012-0123-x>

[6] Romero, F. M., Armienta, M. A. y González-Hernández G. (2007). Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in a abandoned lead/zinc mine tailings imoundment, Taxco, México. *Elsevier*. 22(1). 109-127.

[7] Hudson-Edwards, K. A., Jamieson, Heaher E. y Lottermoser, Bernd G. (2011). Mine Wastes: Past: Present, Furture. *Elements*. 7(6). 375-380.

<http://doi.org/10.2113/gselemnts.7.6.375>

[8] Huges, M. (2006). Biomarkers of exposure: a case study with inorganic aesenic. *Enviromental Health Perspectives*. 114. 1790-1796.

[9] Reyes, V., Veloz, M. y Vargas, M. (2009). Evaluación de las alternativas para la disminución del impacto ambiental por jales históricos en el distrito minero de Zimapán,

<https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/2443/>

[10] Somohano, R. E. (2013). Evaluación de la fitotoxicidad de suelos contaminados por metales pesados en pasivos ambientalrs minero-metalúrgicos. Tesis para la Maestría en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

[11] Jea-Louis, M., Echevarría, G. y Goncharova, N. (2006). Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils. *Nato Science Series; IV Earth and Enviromental Sciences*. 68. 346.

[12] Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristobal-Acevedo, D., Rubiños-Panta, J. E. y Robledo-Santoyo, E. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 15(2). 109-114.

- [13] Camarillo A. S: (2014). Tolerancia a metales pesados y oxianiones de plantas que crecen en suelo contaminado con jales en Zimapán, Hidalgo. Proyecto de integración en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. D.F. México.
- [14] DOF, Diario Oficial de la Federación. Diciembre (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreos y análisis. 3-82.
- [15] SE, Secretaría de Economía (2007). NMX-FF-109-SCFI-2007. Humus de lombriz (lombricomposta) – Especificaciones y Métodos de prueba. México.
- [16] OECD Organisation for Economic Co-operation and Development (2006). Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. 208. 21.
- [17] Climent, J., Alonso, J. y Gil, L. (2004) Arquitectura del sistema radical en dos procedencias de *Pinus canariensis*. IV Congreso Forestal Español. Zaragoza. España.
- [18] Moreno R. H., Blanquer, J. M. y Ibañez, A. S. (1993). El color del suelo. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Producción Vegetal. Centro: Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos. 31. 663-668.
- [19] Raven, P. H., Evert, R. F., y Eichhorn, S. E. (1992). Biología de las Plantas. Volumen 2. Barcelona. España. Editorial Reverté S.A.
- [20] SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. (2012). PROY-NADF-020-AMBT-2011. Que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de la calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal, México. 1446. pp. 82.
- [21] Cervantes García J. G., Solís Guzmán M. G. y Martínez Trujillo M. (2011). Análisis de crecimiento de raíces primarias y raíces laterales de *Nicotiana tabacum* L. en condiciones de estrés generado por Cr (VI). *Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [22] Romero, L. (2008). Pasturas templadas y tropicales. XXI Curso Internacional de Lechería para Profesionales de América Latina. (29). 37-60.
- [23] Perdomo. C., Barbazán, M. y Durán Manzoni, J. M. (2000). Nitrógeno. Área de suelos y agua cátedra de fertilidad. Montevideo Uruguay. Facultad de Agronomía. Universidad de la Republica.

PROPAGACIÓN *IN VITRO* DE AGAVE TOBALÁ (*Agave potatorum*) EN INMERSIÓN TEMPORAL.

Nolasco-Jáuregui, F. E.; Chávez-Ortíz, L. I.; Pérez-Molphe-Balch, E. M. & Rodríguez-Sahagún, A.

ibq.jauregui@gmail.com, Isabel.chavezo@edu.uaa.mx, eperezmb@gmail.com,
araceli.rsahagun@academicos.udg.mx

1. Resumen

El “agave tobalá” o “papalote” es una especie endémica de México, del cual uno de sus usos mas conocidos es la obtención de mezcal, figurando como una de las 10 especies mas usadas para dicho fin. Derivado de la demanda de dicha bebida, se propuso realizar la micropropagación de *A. potatorum* usando medio de cultivo DKW como alternativa al medio MS; además, de un sistema de propagación con inmersión temporal en medio líquido, obteniendo explantes con diferentes tipos de respuesta, entre ellos masas de brotes y vitrificación, aunque también brotes sanos y diferenciados. Demostrando no solo la eficiencia del medio de cultivo como alternativa al tradicional medio basal semisólido, es decir con gelificante. además de determinar que el medio de cultivo DKW es una opción viable para esta especie, con respecto a lo reportado en medio MS.

2. Introducción

Los agaves son especies pertenecientes a la familia *Asparagaceae*, características por su succulencia y encontrarse principalmente en zonas áridas y semiáridas. Son endémicas de México, aunque también pueden encontrarse en varios países del continente americano. Particularmente en el caso de *A. potatorum*, se encuentra distribuido en Puebla y Oaxaca ^[1].

Sin embargo, su reproducción es únicamente sexual, es decir, a partir de semilla. Dada esta condición, para que una planta llegue a una edad de maduración óptima para comenzar su producción de semilla se necesitan entre 10 y 15 años, esto sin considerar el tiempo propio de la floración; además de ser una especie monocárpica, es decir que florece solo una vez ^[1, 2].

Los usos que se identifican para los agaves son variados, considerando que son especies cuya presencia en la vida cotidiana ha sido destacada desde tiempos prehispánicos. Pueden obtenerse fibras, son plantas ornamentales, usadas como alimento o para la producción de estos al usar sus pencas u hojas, el uso de las inflorescencias como alimento, como alimento de ganado, usos medicinales (tanto tópicos como ingeridos),

pero probablemente la mas conocida es la obtención de bebidas alcohólicas destiladas y/o fermentadas ^[1,3].

Las bebidas anteriormente mencionadas, se ven afectadas en la demanda y producción derivado de la disponibilidad de planta de la especie, esto por los tiempos prolongados necesarios para la producción natural, lo cual conlleva a la obtención y saqueo de las especies localizadas en zonas o áreas protegidas para llevarlas a fines de producción de bebidas. Alterando, en consecuencia, la conservación de la especie misma ^[2].

De acuerdo con lo anterior, en la búsqueda de una opción para la sobredemanda, y en consecuencia sobreexplotación de los ejemplares de la especie de interés, se ha recurrido a la Biotecnología para llevar a cabo la micropropagación utilizando medio de cultivo con los nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo del explante vegetal.

El medio de cultivo utilizado ampliamente de la gran mayoría de las especies es el desarrollado por Murashige & Skoog (MS), aunque se han encontrado o desarrollado algunos otros con variaciones en las concentraciones de los nutrientes denominados micro y macronutrientes, de acuerdo con las concentraciones consideradas esenciales y requeridas en los mismos, uno de ellos es el medio de cultivo basal desarrollado por Drive & Kuniyuki (DKW), el cual fue creado para la reproducción de especies leñosas como lo es el nogal californiano, destacando ampliamente la presencia de níquel y las altas concentraciones de nitrógeno así como la forma y fuente de la misma ^[4].

Por otro lado, tenemos que, el medio de cultivo puede ser medio semisólido o líquido, siendo este ultimo una opción con evidencia de mejorar ampliamente los resultados con respecto a crecimiento y desarrollo de embriones o brotes cuando se usa como fuente de nutrientes, multiplicando con respecto a sus respectivos medios semisólidos, siendo el gelificante la diferencia entre ellos ^[5].

Existe una variante de los sistemas donde se usa el medio de cultivo líquido, donde se hacen exposiciones de los explantes al medio en periodos de tiempo determinados previamente; este tipo de sistemas se denomina de inmersión temporal, siendo algunos ejemplos los tanques gemelos, los biorreactores tipo RITA, del tipo SETIS, de ola, entre otros ^[5, 6].

Los SETIS son un tipo de biorreactores que usan la gravedad como parte del funcionamiento de este. Primeramente, se usa una bomba de aire para, por diferencia de presión, pasa el medio de cultivo del recipiente destinado para el mismo (Figura 1) a otro recipiente colocado arriba de éste, de mayor tamaño donde se colocan los explantes o material vegetal, posteriormente al tiempo destinado para la inmersión, se deja de

bombear aire para que el medio de cultivo regrese a su recipiente original. Las condiciones de tiempos, número de explantes, entre otras se determinan de acuerdo con los objetivos de estudio y especies de interés [6].

La propagación *in vitro* en agaves no es tan amplia, y las evidencias que se tienen han sido mayoritariamente en medio de cultivo MS semisólido, que, si bien ha dado resultados buenos de acuerdo con los objetivos de cada una de las investigaciones, este medio se desarrolló para la multiplicación de soya, además de ser variada las especies de agave y en consecuencia las necesidades y resultados cambiaran en consecuencia de ello [7, 8].

3. Condiciones experimentales

Este proyecto de investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Unidad de Biotecnología Vegetal de la Universidad Autónoma de Aguascalientes; el material vegetal utilizado fue proveniente de semilla, previamente desinfectada y germinada en medio de cultivo semisólido MS con 30 g L⁻¹ de sacarosa, 8 g L⁻¹ de agar y sin reguladores de crecimiento vegetal.

Se seleccionaron aleatoriamente alrededor de 20 explantes de los germinados por recipiente, se eliminó la parte aérea y la raíz (en caso de tenerla) dejando un explante basal de alrededor de 2 cm. Para ser colocados dentro de biorreactores de inmersión temporal tipo SETIS, además de medio de cultivo DKW líquido (Phytotechnology laboratories®), adicionado con 2 mg L⁻¹ de Benciladenina (BA) y 30 g L⁻¹ de sacarosa todo el material previamente esterilizado y siendo manipulado únicamente con material estéril y dentro de campana de flujo laminar.

Permanecieron dentro del biorreactor al menos 90 días, a temperatura constante de 25 °C, con fotoperiodos de 16 horas luz y 8 en oscuridad; para posteriormente realizar la separación y conteo de brotes, retirar el resto de medio de cultivo presente en las plántulas obtenidas y luego ser llevados a condiciones *ex vitro* o invernadero, usando como sustrato tierra para maceta; donde permanecieron al menos 60 días para su observación.

Los medios de cultivo usados, tanto el semisólido como el líquido fueron esterilizados previamente a su uso y en su preparación se llevaron a un pH de 5.7.

Se realizó el conteo de brotes obtenidos por explante colocado en el biorreactor, obteniendo el número promedio, así como las características morfológicas destacadas desarrolladas dentro del recipiente. Se utilizó el paquete estadístico GraphPad Prism 8.0.

4. Resultados y discusión

Como resultado de la propagación *in vitro* fue notoria la presencia brotes y plántulas con un tamaño considerablemente mayor a lo registrado para esta especie en propagación con medios de cultivo semisólido MS donde al usar 5 mgL^{-1} y sin BA se tuvieron 1.95 y 1.52 brotes promedio respectivamente [7], en este proyecto se obtuvieron 3.04 brotes promedio por explante.

Además de diferentes morfologías en los explantes sometidos a este tipo de sistema de inmersión temporal. Los SETIS son recipientes de policarbonato y aunque la luz e intensidad lumínica fue artificial (cumpliendo con las condiciones asépticas necesarias), se puede tener diferencias en cuanto a la cantidad de luz que pueda entrar y en consecuencia afectar las respuestas morfológicas de los explantes, como la vitrificación o hiperhidratación, derivada de la alta humedad relativa presente en el ambiente donde están creciendo [9]. Sin embargo, de acuerdo con Correa-Hernández [10], el cambiar los tiempos y frecuencias de inmersión se ajustará a cada especie y el número de explantes que se tenga dentro del recipiente. Pues, afecta directamente en la respuesta. Derivado de ello, el agregar ciclos de aireación puede tener mejores efectos en la multiplicación de explantes.



FIGURA 1: BIORREACTOR DE INMERSIÓN TEMPORAL TIPO SETIS, DONDE EL RECIPIENTE SUPERIOR Y DE MAYOR TAMAÑO ES DESTINADO PARA EL MATERIAL VEGETAL Y EL INFERIOR PARA EL MEDIO DE CULTIVO LÍQUIDO.

El medio de cultivo DKW, como ya se ha mencionado, es un medio desarrollado para especies leñosas, sin embargo, el agave de interés se encuentra principalmente en zonas clasificadas “como bosque tropical caducifolio, matorral xerófilo y transición de estos con el bosque de Quercus” [11]. El medio DKW presentó un promedio de brotes por explante de 3.04 y un tamaño de 3.8 cm promedio; siendo posible así facilitar la aclimatación a sustrato y condiciones *ex vitro*, pues, además en mas de la mitad de los brotes obtenidos se contaba con presencia de raíz de al menos 2 cm. Con lo anterior no solamente no es necesario llevar a cabo la etapa de enraizamiento, sino que facilita la aclimatación con la presencia de raíz previa a la aclimatación [4].



FIGURA 2: IZQ: BROTE DE A. POTATORUM, OBTENIDO EN BIORREACTOR TIPO SETIS. NOTA: CADA CUADRO MIDE 1 CM². DER: PLÁNTULAS DE A. POTATORUM EN INVERNADERO POSTERIORMENTE A 60 DÍAS EN DICHAS CONDICIONES.

Con respecto a las plántulas obtenidas, se llevaron a invernadero, donde el sustrato fue tierra para maceta, con riego continuo para humedad continua del sustrato mismo. Se tiene hasta ahora un 100% de supervivencia y/o aclimatación a condiciones *ex vitro*, de acuerdo con Van Huylbroeck y colaboradores [], la aclimatación es una etapa donde pueden tener gran porcentaje de pérdidas de las hojas principales o de la planta completa, pues el desarrollo de ciertas ceras o engrosamiento de la cutícula necesario para llevar a cabo la fotosíntesis de las especies CAM y la correcta apertura de las estomas.

5. Conclusiones

Ese trabajo de investigación demuestra el uso de medios de cultivo alternativo al tradicionalmente usado MS, eficiente para la propagación *in vitro*, en este caso de la

especie de interés *Agave potatorum*. Además de la eficiencia del sistema de biorreactores de inmersión temporal del tipo SETIS®

6. Bibliografía

- 1.- Torres, I., Casas, A., Delgado-Lemus, A. & Rangel-Landa, S. (2013). *Aprovechamiento, demografía de Agave potatorum en el Valle de Tehuacán, México: Aportes ecológicos y etnobiológicos para su manejo sustentable*. En: Zonas áridas 15 (1): 92-109. ISSN: 1814-8921.
- 2.- Enríquez del Valle, J. R., Alcara-Vázquez, S. E., Rodríguez-Ortíz, G., Miguel-Luna, M. E. & Vázquez, C. M. (2016). *Fertirriego en vivero a plantas de Agave potatorum Zucc micropropagadas-aclimatadas*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 7 (5): 1167-1177.
- 3.- Aguirre-Dugua, X. & Eguiarte, L. E. (2012). *Genetic diversity, conservation and sustainable use of wild Agave cupreata y Agave potatorum extracted for mezcal production in Mexico*. Journal of Arid Environments 90: 36-44. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2012.10.1018
- 4.- Uribe-Moraga, M. & Cifuentes G., L. (2004). *Aplicación de técnicas de cultivo in vitro en la propagación de Legrandia concinna*. Bosque. 25 (1): 129-135.
- 5.- Mancilla-Álvarez, E., Pérez-Sato, J. A., Núñez-Pastrana, R., Spinoso-Castillo, J. L., Bello-Bello, J. J. (2021). *Comparison of different semi-automated bioreactors for in vitro propagation of taro (Colocasia esculenta L. Schott)*. Plants. 10, 1010. DOI: 10.3390/plants10051010.
- 6.- Murthy, H. N., Paek, K. Y. & Park, S. Y. (2023). *Bioreactor systems for micropropagation of plants: present scenario and future prospects*. Front plant Sci. 14: 1159588. DOI: 10.3389/fpls.2023.1159588.
- 7.-Marcelin-Iñiguez, M. J. (2023). Micropropagación de agaves mezcaleros (*Agave karwinskii* Zucc, *A. potatorum* Zucc., *A. marmorata* Roezl). TESIS MAESTRIA. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.
- 8.- Murashige, T. & Skoog, F. 1962. *A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures*. Physiol. plant. Vol: 15.
- 9.- Van Huylenbroeck, J. M., Piqueras, A. & Debergh, P. C. (1998). *Photosynthesis and carbon metabolism in leaves formed prior and during ex vitro acclimatization of micropropagated plants*. En: plant Science. 134: 21-30.
- 10.- Correa-Hernández, L. (2021). *Multipliación in vitro de agave tobalá (Agave potatorum Zucc.) utilizando un sistema de inmersión temporal*. TESIS: para recibir el grado de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- 11.- García-Mendoza, A. (2011). *Agavaceae. Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*. 88: 1-95.

Efecto de diferentes medios basales en el cultivo *in vitro* de Cactáceas

Ruiz Esparza Méndez, M A,¹ Pérez Molphe Balch, E M,¹ Chavez Ortiz, L I, ¹ Núñez Palenius ².

¹ Departamento de Química, Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes.

² Departamento de Agronomía, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

bio.marem@hotmail.com, eperezmb@gmail.com, isabel.chavez@edu.uaa.mx,
palenius@ugto.mx

1. Resumen

Las cactáceas habitan ecosistemas áridos y semiáridos del continente americano, sus suelos son pobres en nutrientes y de agua. Desgraciadamente, es un grupo de plantas amenazado. Por lo que se han cultivado por métodos tradicionales, sin embargo, la generación de nuevas plántulas es limitada. Su cultivo *in vitro* produce un mayor número de ejemplares. Pero su cultivo en medio MS, ha causado respuestas no deseadas que interfieren con el éxito de su producción. En esta investigación se trabajó con especies que son de gran interés cultural, alimentario, y una fuente de compuestos naturales, así como su rol ecológico en las regiones que habita. En esta investigación se han propagado las especies *Astrophytum asterias*, *Coryphanta elephantidens*, *Coryphanta macromeris*, *Echinocactus platyacanthus*, *Mammillaria zeilmanniana*, *Polaskia chichipe*, *Stenocereus pruinosus*, y evaluado sus respuestas al cultivo *in vitro* cuatro medios basales: MS, N6, B5, y WPM. Como resultado a los distintos nutrientes proporcionados se han registrado diferentes repuestas en las especies usadas como vitrificación, tejido calloso y la oxidación de los explantes. Se ha sugerido el mejor medio para cada especie, para evitar respuestas no deseadas y garantizar el mayor número de brotes por explante.

2. Introducción

Los cactus son una familia de plantas que distribuyen en todo el continente americano ^[1]. La familia está constituida por 124 géneros y aproximadamente 2000 especies. Se clasifica en cuatro subfamilias: Pereskioideae, Maihuenioideae, Opuntioideae y Cactoideae ^[2]. En el país, se distribuyen habitando regiones áridas, o en regiones de clima húmedos en las costas. Los cactus representan son un elemento vegetal que sobresale de en las zonas áridas y semiáridas de México

Los cactus tienen una gran importancia cultural y económica. Los cactus, son aprovechadas como alimento, medicina, ornato, forraje y material de construcción ^[3]. Además de estos usos, los cactus son atractivos para la industria por la gran variedad de metabolitos secundarios que producen, se han identificado alcaloides, compuestos fenólicos, y terpenos, y se ha reportado su efecto

antimicrobiano, antioxidante, analgésico y antiinflamatorio ^[4]. También tienen un papel ecológico importante, especies animales como insectos, reptiles, aves y mamíferos, consumen el néctar y polen de sus flores, y frutos, por lo tanto, participan en la polinización y dispersión de semillas. Se han puesto en riesgo varias especies de cactus, por factores como la degradación de su hábitat, el saqueo y tráfico ilegal ^[5]. El cultivo de los cactus es muy popular debido a su tractivo como plantas ornamentales, desarrollando métodos eficientes para producirlos, por medio de semillas o por propagación vegetativa por hijuelos o injertos. Su propagación por métodos convencionales no es suficiente para su reproducción masiva, algunas especies pueden ser complicadas de reproducir por su crecimiento lento, y las condiciones que requiere para su floración y producción de semillas ^[6].

Es importante considerar la propagación *in vitro* de cactáceas, por su valor económico y su lento crecimiento. En este trabajo se propago, *Echinocactus platyacanthus*, cactus de gran importancia económica y cultural en México dicha especie está amenazada debido su explotación desmedida para uso ornamental y para la elaboración del dulce acitrón, debido a esto se han reducido sus poblaciones considerablemente ^[7]. Otra especie con valor alimenticio es *Stenocereus pruinosus* es una especie que es de interés propagarla, ya que es aprovechada por sus frutos, su aprovechamiento ha provocado daños en sus ejemplares durante la cosecha de sus frutos, facilitando la entrada a enfermedades fúngicas. Su producción se realiza en huertos familiares y plantaciones comerciales con prácticas de agrícolas respetuosas al ambiente ^[8]. También es el caso de *Polaskia chichipe*, cactus de importancia económico debido a sus frutos comestibles, al igual que otras especies de cactus columnares han sido de importancia por sus frutos y por el empleo de sus tallos en otras actividades como material de construcción y combustible. Asimismo, especies como *Coryphanta macromeris*, resalta su interés por su capacidad para producir metabolitos, que representan una fuente rica de compuestos naturales que pueden ser usados en la industria farmacéutica y alimenticia ^[9].

En esta investigación las cactáceas se micropropagaron por la inducción de brotes en las areolas. Se ha utilizado el medio Murashige & Skoog (1962), fórmula generalmente usada para la micropropagación de cactáceas. Sin embargo se han reportado efectos en los tejidos de los cactus que limitan su propagación y que son asociados al medio MS: la necrosis del explante como resultado de la liberación de compuestos fenólicos, la vitrificación, que es un desorden de los tejidos en el cual se acumula excesivamente agua, y disminución en el rendimiento fotosintético, y la generación excesiva de tejido calloso que se relaciona la humedad relativa alta y al exceso de nutrientes ^[10]. En este estudio se han cultivado cactus en medios distintos al medio MS, el medio Gamborg B5 (1968), formulado para el cultivo de soya, que contiene una concentración mayor de nitrato de potasio a comparación del medio MS. También, se usó el medio N6 (Chu, 1975), desarrollado para el cultivo de callos de arroz, este medio suministra sulfato de amonio en lugar de nitrato de amonio. El medio Woody Plant Medium (Lloyd & McCown, 1980), empleado en plantas leñosas, este medio tiene una menor concentración de sales de micronutrientes, nitrógeno total y menos cantidad de amonio a comparación con el medio MS. El objetivo de esta investigación es conocer la respuesta de los tejidos

3. Condiciones experimentales

En la investigación se trabajó con 6 especies de Cactáceas: *Astrophytum asterias*, *Coryphanta elephantidens*, *Coryphanta macromeris*, *Echinocactus platyacanthus*, *Mammillaria zeilmanniana*, *Polaskia chichipe*, *Stenocereus pruinosus*, obtenidas del Banco de Germoplasma de la Unidad de Biotecnología Vegetal de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Estas especies se cultivaron en las sales basales de los medios MS, N6 y WPM con solución de vitaminas de MS, y en el medio B5 con vitaminas de B5. Se suplementó cada medio con 1 mg L⁻¹ de 6-bencilaminopurina, 30 g L⁻¹ de sacarosa, y 10 g L⁻¹ de agar, y se ajustó el pH 5.7. Todos los cultivos se mantuvieron a una temperatura de 25 °C, en un fotoperiodo con lámparas de luz blanca fluorescente de 16h luz y 8 h oscuridad. Se emplearon explantes transversales de tallo de 3 a 5 mm, que se inocularon en cada uno de los tratamientos. Se incubaron hasta observar la diferenciación de los brotes y se registró el número de brotes sanos, porcentaje de vitrificación y tejido calloso. Los datos del número de brotes sanos se analizaron con el software GraphPad Prism 8.0, mediante la prueba ANOVA de una vía paramétrica y la prueba comparativa de Dunn's tomando como control al tratamiento MS para *A. asterias*, *Coryphanta macromeris*, *Echinocactus platyacanthus*. Para *Coryphanta elephantidens*, *Mammillaria zeilmanniana*, *Polaskia chichipe*, *Stenocereus pruinosus*, con una distribución no normal se usó la prueba Kruskal-Wallis, y la prueba de comparativa de Dunnett's tomando como control al tratamiento MS.

4. Resultados y discusión

En cuanto a los análisis estadísticos, se logró comprobar diferencias significativas entre los cultivos de MS y B5 de *Mammillaria zeilmanniana*, respecto al valor de $P \leq 0.05$. El cultivo *in vitro* de los tejidos vegetales de las especies *Astrophytum asterias*, *Coryphanta elephantidens*, *Coryphanta macromeris*, *Echinocactus platyacanthus*, *Mammillaria zeilmanniana*, *Polaskia chichipe*, y *Stenocereus pruinosus*, en los medios MS, N6, B5, y WPM, generó distintas respuestas, como la producción de brotes sanos y vitrificados, tejido calloso, y la oxidación del explante interfiriendo en su brotación (Tabla 1).

Los medios MS y WPM resultaron ser los medios con un número mayor de brotes en *Astrophytum asterias*. El tejido calloso se presentó en el 100 % de explantes cultivados en los cuatro medios probados, así como la generación de brotes vitrificados con 49.3 % en MS y 9.3% en B5. En un estudio con *A. asterias*, se reportó que es común la generación de tejido calloso en la parte del explante donde se realizó el corte, además con mayor frecuencia cuando no se cuida la polaridad del explante [11]. En la especie *Coryphanta elephantidens* no se presentaron brotes vitrificados o la generación excesiva de tejido calloso; sin embargo, la producción de brotes fue muy baja siendo B5 el medio con más brotes con un promedio de 1.5 brotes por explante. En *Coryphanta macromeris* solo se registraron brotes vitrificados en los cultivos de WPM con porcentaje de 4.2% y el 12.5 % de tejido calloso, y en promedio se produjeron 6 brotes por explante en MS y WPM, y en menor cantidad en los medios N6 y B5 con 2.5 brotes por explante. La propagación *in vitro* de *C. macromeris* en medio sin reguladores de crecimiento puede generar hasta 4.5 brotes por explante, y en un medio con BA+ANA es de 2 brotes por

explante ^[9]. Según los resultados obtenidos del cultivo en MS se puede sugerir que el uso de BA puede ser mas eficiente para la formación de nuevos brotes.

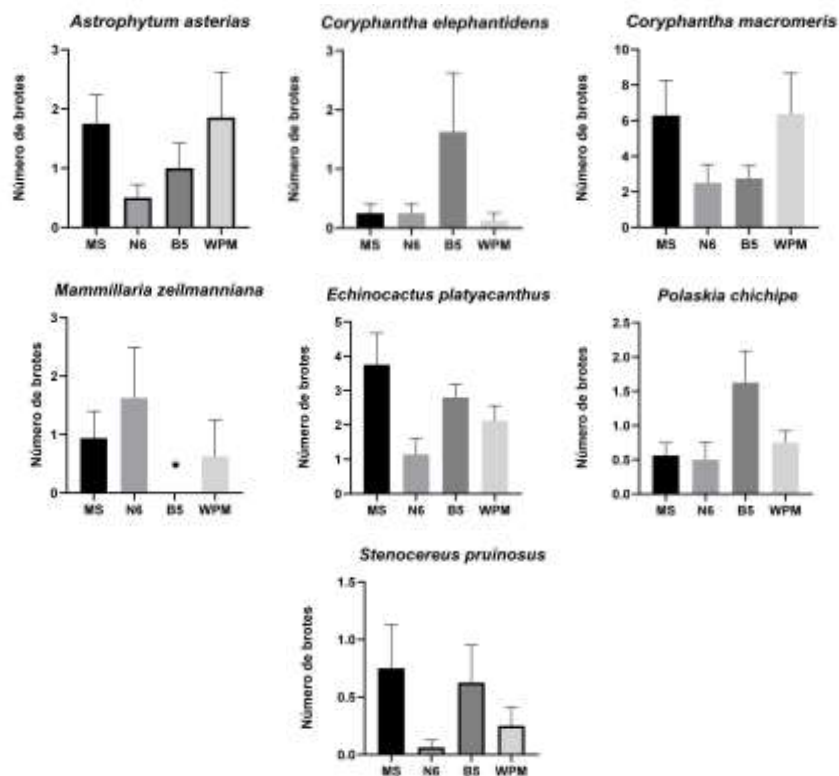


Figura 1. Número de brotes sanos por explante en las especies *Astrophytum asterias*, *Coryphanta elephantidens*, *Coryphanta macromeris*, *Echinocactus platyacanthus*, *Mammillaria zeilmanniana*, *Polaskia chichipe*, y *Stenocereus pruinosus*. Las barras representan el error estándar, los asteriscos (*) muestran cuando hay diferencias significativas $P < 0.05$, tomando a MS como control según la prueba de Dunn's.

Para *Echinocactus platyacanthus*, no se registraron respuestas negativas y MS fue el medio con un mayor número de brotes por explantes con 4, en esta especie se ha reportado anteriormente su cultivo únicamente en medio MS, donde se sugiere que los nutrientes de este medio han promovido exitosamente el crecimiento, y la generación de biomasa ^[12]. Para la especie *Polaskia chichipe*, B5 produjo el mayor número de brotes por explante con un promedio de 1.5 brotes y en MS se obtuvo 0.5 brotes, se ha descrito anteriormente su cultivo solo en MS + 1.0 mg L⁻¹ de BA, se obtuvo un promedio de 11.5 brotes por explante ^[13]. Esto difiere totalmente con los resultados obtenidos, puesto que el número de los brotes es significativamente reducido a lo que se reporta es la investigación citada. En *Stenocereus pruinosus* se obtuvo un promedio de 0.8 brotes por explante en el cultivo con MS, siendo este el medio con el mayor número de brotes; el

número de brotes registrado fue menor que la reportado en *Stenocereus stellatus* su cultivo produjo 3.4 brotes por explante en medio MS+ 1mg L⁻¹ de BA ^[14].

La vitrificación en los brotes de *A. asterias* puede estar mediada la concentración de los nutrientes en los cuatro medios utilizados influyen las respuestas de cada especie estudiada, tal es el caso del medio MS, y se presentó el 50% de vitrificación en los brotes generados. Esta respuesta se sugiere puede deberse a la concentración de amonio en el medio MS, ya que el amonio tiende a ser absorbido rápidamente por los tejidos ^[15]. Esta respuesta en *A. asterias* se sugiere puede contrarrestarse haciendo modificaciones a los medios de cultivo, se disminuyó la vitrificación en la especie *Turbinicarpus mobergeri*, al adicionar una mayor concentración de calcio al medio y reduciendo las sales de MS a un cuarto de su concentración original ^[15].

Tabla 1. Respuesta de seis especies de cactáceas al cultivo *in vitro* en cuatro medios basales.

Especie	Medio	% vitrificación	%Tejido calloso
<i>Astrophytum asterias</i>	MS	48.3	100
	N6	0	100
	B5	9.3	100
	WPM	0	100
<i>Coryphantha elephantidens</i>	MS	0	0
	N6	0	0
	B5	0	0
	WPM	0	0
<i>Coryphantha macromeris</i>	MS	0	0
	N6	0	0
	B5	0	0
	WPM	4.167	12.5
<i>Echinocactus platyacanthus</i>	MS	0	0
	N6	0	0
	B5	0	0
	WPM	0	0

<i>Mammillaria zeilmanniana</i>	MS	0	0
	N6	0	0
	B5	0	0
	WPM	0.625	12.5
<i>Polaskia chichipe</i>	MS	0	100
	N6	0	100
	B5	0	0
	WPM	0	25
<i>Stenocereus pruinosus</i>	MS	0	0
	N6	0	0
	B5	0	0
	WPM	0	0

Otra respuesta problemática en el cultivo de tejidos vegetales de cactáceas es la generación excesiva de tejido calloso. En *Polaskia chichipe* no se generaron brotes vitrificados, pero si la producción de tejido calloso en MS, N6 y WPM. En *Mamillaria zeilmanniana*, solo se generó tejido calloso en el cultivo con WPM en el 12.5% de los explantes, esta se sugiere puede estar influenciada por la cantidad de nutrientes disponibles en el medio, al igual que otras condiciones a las que se someten los tejidos como la humedad relativa, esto altera el crecimiento de los tejidos. Asimismo, esa repuesta está relacionada con la integridad de la pared celular ^[17]. Por otro lado, un aspecto positivo es su uso en la producción de biomasa para la obtención de metabolitos secundarios, por su crecimiento acelerado ^[1.].

La oxidación de los explantes se observó en los cultivos de *Polaskia chichipe* y *Steneocerues pruinosus* en N6, B5, WPM, esta respuesta interfirió negativamente en la brotación de los explantes. Se observó que la oxidación provocó la necrosis de los explantes antes de que estos generaran brotes. Se sugiere que la oxidación y necrosis puede ser consecuencia de los cortes hechos a los explantes, se describe que la oxidación es una respuesta al daño en el que se liberan fenoles y en la que pueden participar en enzimas como polifenol oxidasas, peroxidasas y fenilalanina amonio liasas ^[19].

5. Conclusiones

La concentración de nutrientes disponibles para el cultivo *in vitro* de las siete especies estudiadas, influye en el número de brotes, y en respuestas morfogénicas como, vitrificación, oxidación y tejido calloso. Para obtener el mayor número de brotes y evitar las respuestas no deseadas durante la micropropagación, se sugiere emplear el medio MS en *Coryphanta macromeris*, *Echinocactus platyacanthus*, y *Stenocereus pruinosus*; el medio B5 en *Coryphanta elephantidens* y *Polaskia chichipe*. Por último, se recomienda el medio WPM para *Astrophytum asterias*, y N6 para *Mammillaria zeilmanniana*.

6. Bibliografía

1. Guerrero, P. C., Majure, L. C., Cornejo-Romero, A., & Hernández-Hernández, T. (2019). Phylogenetic Relationships and Evolutionary Trends in the Cactus Family. *Journal of Heredity*, 110(1), 4–21. <https://doi.org/10.1093/jhered/esy064>
2. Jiménez Sierra, C. L. (2011). Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. *Revista Digital Universitaria*, 12(1), 1–23. <http://www.revista.unam.mx/vol.12/num1/art04/art04.pdf>
3. Domenico Prisa. (2022). Botany and uses of cacti. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 21(1), 287–297. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2022.21.1.0405>
4. Santos-Díaz, M. del S., & Camarena-Rangel, N. G. (2019). Cacti for production of metabolites: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(21–22), 8657–8667. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10125-5>
5. Ortega-Baes, P., Sühring, S., Sajama, J., Sotola, E., Alonso-Pedano, M., Bravo, S., & Godínez-Alvarez, H. (2010). Diversity and Conservation in the Cactus Family BT - Desert Plants: Biology and Biotechnology (K. G. Ramawat, Ed.). https://doi.org/10.1007/978-3-642-02550-1_8
6. Bouzroud, S., El Maaiden, E., Sobeh, M., Devkota, K. P., Boukcim, H., Kouisni, L., & El Kharrassi, Y. (2022). Micropropagation of *Opuntia* and Other Cacti Species Through Axillary Shoot Proliferation: A Comprehensive Review. *Frontiers in Plant Science*, 13(July). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.926653>
7. Figueroa-Cabañas, M., & Barcenas, R. T. (2023). Conservation genetics of the protected candy barrel cactus *Echinocactus platyacanthus* in the Chihuahuan Desert Region. *REVISTA MEXICANA DE BIODIVERSIDAD*, 94, e945214. <https://doi.org/dibpxy.uaa.mx/10.22201/ib.20078706e.2023.94.5214>
8. Bravo-Aviles, D., Nieto-Garibay, A., & Rendón-Aguilar, B. (2023). Characterization of the damage and its effect on the production of pitayas *Stenocereus pruinosus* and *S. stellatus* under different forms of management in Central Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 25, 214–228. <https://doi.org/dibpxy.uaa.mx/10.56890/jpacd.v25i.527>
9. Cabañas-García, E., Areche, C., Gómez-Aguirre, Y. A., Borquez, J., Muñoz, R., Cruz-Sosa, F., & Pérez-Molphe Balch, (2021). Biomass production and secondary metabolite identification in callus cultures of *Coryphantha macromeris* (Engelm.) Britton & Rose (Cactaceae), a traditional medicinal plant. *South African Journal of Botany*, 137, 1–9.

10. Pérez-Molphe-Balch, E., Santos-Díaz, M. D. S., Ramírez-Malagón, R., & Ochoa-Alejo, N. (2015). Tissue culture of ornamental cacti. *Scientia Agricola*, 72(6), 540–561. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0012>
11. Ivannikov, R., Lobova, O., Ivannikova, N., & Krasnienkova, I. (2022). Micropropagation and organogenesis of *Astrophytum asterias* (zucc.) Lem. (cactaceae juss.), *Blossfeldia liliputiana* werderm. And *Strombocactus disciformis* (dc.) Britton & rose. *Journal of Microbiology, Biotechnology & Food Sciences*, 11(5), 1–4. <https://doi-org.dibpxy.uaa.mx/10.55251/jmbfs.2201>
12. Gómez-Serrano, G., Martínez, Joel, Arreguín-Sánchez, M.L., & García Ochoa, F. (2021). Germinación y crecimiento de *Echinocactus platyacanthus* Link & Otto (Cactaceae). *Polibotánica* n.52 2021.
13. Retes-Pruneda, María de Lourdes Valadez-Aguilar, Martha Evelia Pérez-Reyes, & Eugenio Pérez-Molphe-Balch. (2007). Propagación *in vitro* de especies de *Echinocereus*, *Escontria*, *Mammillaria*, *Melocactus* y *Polaskia* (Cactaceae). *Botanical Sciences*, 81. <https://doi-org.dibpxy.uaa.mx/10.17129/botsci.1761>
14. Martínez Villegas, Ylvi María, Andrade Rodríguez, María, Villegas Monter, Ángel, Alia Tejacal, Irán, Villegas Torres, Oscar Gabriel, & López Martínez, Víctor. (2011). Cultivo in vitro de pitayo (*Stenocereus stellatus* [Pfeiffer] Riccobono). *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 17(3), 95-105. Recuperado en 22 de agosto de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000300002&lng=es&tlng=.
15. Polivanova, O. B., & Bedarev, V. A. (2022). Hyperhydricity in Plant Tissue Culture. *Plants*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/plants11233313>
16. Santos-Díaz, M., Santos-Díaz, M., & Alvarado Rodríguez, J. (2021). In Vitro Regeneration of The Endangered Cactus *Turbincarpus mombergeri* Riha, A Hybrid of *T. laui* x *T. pseudopectinatus*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-742548/v1>
17. Ikeuchi, M., Sugimoto, K., & Iwase, A. (2013). Plant callus: mechanisms of induction and repression. *The plant cell*, 25(9), 3159-3173.
18. da Silva Santos, É., Savam, A., Cabral, M. R. P., Castro, J. C., de Oliveira Collet, S. A., Mandim, F., & Gonçalves, R. A. C. (2022). Low-cost alternative for the bioproduction of bioactive phenolic compounds of callus cultures from *Cereus hildmannianus* (K.) Schum. *Journal of Biotechnology*, 356, 8-18.
19. Nandang Permadi, Sulistya Ika Akbari, Dedat Prismantoro, Nastiti Nur Indriyani, Mohamad Nurzaman, Arshad Naji Alhasnawi, Febri Doni, & Euis Juliaha. (2024). Traditional and next-generation methods for browning control in plant tissue culture: Current insights and future directions. *Current Plant Biology*, 38(100339-). <https://doi-org.dibpxy.uaa.mx/10.1016/j.cpb.2024.100339>

Síntesis y caracterización de nanopartículas de selenio y quitosano para biofortificación de suelo cebollero y control fitopatógeno en cultivo de cebolla

Orozco, O.J.¹, Luna, M. A.², Salas, J.S.³ Ramirez C.A.⁴

¹[Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.](#)²

antonia.luna@cimav.edu.mx

claudia.ramirez@cimav.edu.mx

joan.salas@cimav.edu.mx

oscar.orozco@cimav.edu.mx

1. Resumen

Los fitopatógenos latentes en suelos agrícolas productores de cebolla y las altas demandas de producción, ha generado consecuencias en el desarrollo y el rendimiento de los cultivos, afortunadamente ya se cuenta con la nanotecnología enfocada a las ciencias agrícolas, la cual ha contribuido en el desarrollo optimo de los cultivos, promoviéndola fortificación con NPs, un ejemplo de estas contribuciones es la aplicación de selenio y quitosano a nanoescala, los cuales tiene el potencial de mejorar el rendimiento de los cultivos en diversas condiciones de estrés, aumentando el crecimiento y la productividad. En esta investigación se pretende fabricar una solución para controlar la pudrición rosada de la cebolla mediante una síntesis de SeNPs cubiertas por CS, de manera amigable con el medio ambiente. La caracterización mediante TEM, EDS, FTIR, DRX e ICP. Dio como resultado nanopartículas esféricas de 58 nm de diámetro, recubiertas con 82% de materia orgánica y mostrando grupos funcionales proveniente del quitosano, aseverando el proceso de síntesis para su posterior uso en campo cebollero.

2. Introducción

La cebolla se considera la 2da hortaliza que se produce en todo el mundo. En México, principalmente en los estados del norte, es un cultivo de gran importancia a nivel económico, sin embargo, su producción es condicionada por diferentes factores que afectan la calidad del producto final, dentro de los más importantes se encuentra la pudrición rosada de la raíz, causada por *Pyrenochaeta terrestres*, hongo fitopatógeno latente en suelos y responsable de pérdidas económicas significativas, caracterizada por la pigmentación rosa y necrosis a nivel radicular, enanismo del bulbo aunado a clorosis y formación de corcho en el ápice, junto a esto, la mala calidad del suelo (suelos pesados,

compactos, faltos de nutrientes, con deficiente drenaje y materia orgánica) promueve el agravio de la enfermedad.[1][2]

Generalmente las prácticas de control para este fitopatógeno se basan en la adición de fungicidas químicos, altamente agresivos y biocontroles como *T. harzianum*, inhibiendo el crecimiento del hongo, sin erradicar su presencia. [IC-1] Investigaciones actuales proponen la biofortificación con selenio en los suelos donde se cultiva cebolla como método de control de plagas, se ha demostrado su efectividad en la inhibición del crecimiento de hongos fitopatógenos como *Fusarium sp.* y *Alternaria brassicicola*, de igual forma es capaces de inhibir tanto bacterias Gram-negativas como Gram-positivas con igual eficacia. Las propiedades de son exaltadas cuando se presenta en forma de nanopartículas (NPs), potencializando sus beneficios, aun cuando de han propuesto varios métodos físicos y químicos para su síntesis, se concluye que la forma más eficiente, es la reducción química de las sales de selenio. Dentro de las principales ventajas en la biofortificación de suelos usando nanopartículas de selenio (SeNPs), está, la baja toxicidad, degradabilidad y excelente antiviral, de igual forma, han demostrado ser prometedores agentes antibacterianos demostrado su eficiencia contra los perjuicios de las enfermedades en muchos cultivos. Su actividad bioquímica sobre un cultivo desemboca en el aumento de crecimiento, mejor contenido nutricional, mayor eficacia en la fotosíntesis, inducción de antioxidante mediante activación hormonal, restablecer el metabolismo primario y secundario y desarrollar la adaptación de las plantas a condiciones ambientales desfavorables. [3] [4]

Si bien, las nanopartículas de selenio suelen ser propensas a aglomerarse en medios acuosos, reducción de su bioactividad y biodisponibilidad. La estabilización con quitosano (CS) resulta una de las mejores alternativas, sumado a esto se encarga de la liberación lenta de las SeNPs, optimizar el y la producción de bulbos de cebolla a nivel de campo en condiciones semiáridas, minimizar la pérdida de peso fisiológico y proteger la pudrición del bulbo de cebolla en el almacenamiento. La estructura a nano escala del CS y sus grupos funcionales también le sirven como potente bactericida, excelente fungicida y antiviral, al fungir como elicitador, tiene la capacidad de activar la principal respuesta de defensa en las plantas, desencadenar la expresión de proteínas protectoras en la superficie celular y el aumento en las especies reactivas de oxígeno. [5] Por tanto, la asociación de estos componentes puede ser la mejor alternativa para el control de esta enfermedad fitopatógena y estabilizar los suelos al evitar su compactación y deshidratación prematura durante el crecimiento de la cebolla. Además, este elemento está involucrado en un gran número de procesos biológicos y metabólicos de las plantas al fungir como elicitador natural. Las Se-NP son particularmente eficaces y altamente

eficientes contra la pudrición de la raíz y las enfermedades de la corona causadas por especies de *Fusarium*. [6]

3. Condiciones experimentales

3.1. Muestreo, acondicionamiento y caracterización de suelo.

Las muestras se adquirieron de dos campos agrícolas productores de cebolla, el 1ero se dividió en dos secciones debido a su apariencia física (de la entrada del campo al centro fue el 1er lugar de muestreo y del centro al final del campo se consideró como el 2do lugar de recolección), se tomaron aleatoriamente 3 muestras del horizonte "A" en cada punto seleccionado, se empacaron herméticamente en bolsas Ziploc para su resguardo y se transportaron al laboratorio en una hielera, antes de proseguir con el acondicionamiento, se mezcló homogéneamente las 3 muestras obtenidas de cada punto. Dentro de un área ventilada con poca humedad, se extendió cada mixtura sobre papel estraza, sobre una superficie plana y se removió la naturaleza muerta, durante 5 días se mezcló cada mixtura homogeneizando su secado, posteriormente en condición aséptica, cada mixtura, fue tamizada con la malla # 280µm seguido del # 200µm, el suelo cribado se recolectó y almacenó en refrigeración a 4°C. La determinación físico-química del suelo fue elaborada por la empresa UNIFRUT.

3.2. Obtención de cebollas con afecciones fitopatológicas.

Las cebollas se extrajeron de ambos campos agrícolas, a posteriori del muestreo de suelo, esto facilitó la recolección completa de la cebolla, debido a la descompresión del suelo, se cosecharon 12 ejemplares que, mediante inspección visual, mostraron daño estructural en el bulbo y la raíz. Las muestras de cebolla se resguardaron en bolsas de papel y se transportaron a los laboratorios en una hielera con gel refrigerante.

3.3. Aislamiento del agente fitopatígeno

En condiciones asépticas, se realizaron cortes segmentados de 1.5 cm en cada raíz afectada, los fragmentos se lavaron con 20 mL de agua destilada estéril, generando movimientos circulares suaves por 2 min, se realizaron 3 lavados, asegurando la dilución microbiana. El medio de cultivo utilizado fue "Agar dextrosa papa", cada medio solido fue horadado por triplicado, formando un triángulo, en cada orificio se colocaron 3 fragmentos de raíz y se incubó durante 5 días a 27°C, se extrajo la colonia más abundante, esta se transfirió a un medio fresco, este procedimiento (replicación y purificación) se realizó 4 veces bajo las mismas condiciones de crecimiento, logrando la colonización del hongo con tonalidad rosa. Por último, se identificó al hongo aislado mediante la creación de un

micro cultivo al cual se le realizó una tinción con azul de lactofenol, para observar su morfología microscópica.

3.4. Síntesis de SeNPs y caracterización mediante TEM, EDS, DRX & FTIR

Se colocaron 70 mL de agua tridestilada y 6 mL de selenito de sodio (100 mM) en un matraz Erlenmeyer, en agitación moderada, posteriormente, se agregaron por goteo 24 mL de ácido ascórbico (100 mM), en agitación constante por 30 min. Las SeNP se centrifugaron a 11000 rpm/30 min, consiguientemente se lavó el pellet con 15 mL de agua tridestilada, continuo de una sonicación por 10 min y una centrifugación a 11000 rpm/30min (se plicaron 3 lavados). Las SeNPs lavadas, se secaron a 25°C/48 h sobre un vidrio de reloj, por último, se compilaron las nanopartículas mediante raspado superficial suave e inmediatamente se aplicó una molienda, las SeNPs pulverizadas se destinaron a su caracterización.

El análisis morfológico y la composición elemental se lograron realizando una dilución de 1.33 mg/mL de SeNPs en H₂O destilada, sumad aun periodo de sonicación por 8 min. La rejilla de óxido de silicio se impregno con 10 µL de la dilución, el secado dese realizó a 25°C/10 min, este proceso se realizó por triplicado.

La técnica de caracterización TEM se ejecutó a un voltaje de aceleración de 100.0kV, en el equipo TEM Hitachi 7700, el análisis elemental fue generado por el EDS equipado al TEM Hitachi 7700. La distribución de tamaño de las SeNPs, fue proporcionada por las micrografías electrónicas obtenidas del TEM adjuntas al software ImageJ

El análisis cristalográfico fue descifrado mediante DRX, la muestra se analizó con geometría Bragg-Brentano en un ángulo $\Theta - 2\Theta$, partiendo de los 0° hasta 80°, a pasos cortos de 0.015 en un tiempo de 5 segundos en el Difractometro BRUKER, la identificación de la fase cristalina fue obtenida de investigaciones y resultados previos de otros autores.

El método de identificación química para los grupos funcionales y enlaces de superficie se efectuó con FTIR, realizando la identificación de los picos más prominentes obtenidos en el rango de 4000 a 500 cm⁻¹. Los datos analizados se adquirieron del equipo Espectrofotómetro IR Affinity 1S Shimadzu.

3.5. Síntesis de SeNPs-CS y caracterización a través de TEM, EDS, DRX & FTIR

Se mezclaron 10 mL de CS (0.5%) en ácido acético (2%) y 85 mL de agua tridestilada con agitación moderada, luego, se agregó 1 mL de selenito de sodio (100 mM) en dosis (100 µL), en movimiento constante a 600rpm/30min, posteriormente se

adicionó un volumen de 4 mL de ácido ascórbico (100 mM) en dosis (200 μ L), con velocidad de agitación constante durante 30 min. Las SeNP-CS se recuperaron por centrifugación a 12,000rpm/30min y se lavaron con 10 mL de ácido acético (0.02%) seguido de una sonicación por 15 min, de manera consecuente, se centrifugó el NC a 12,000rpm/30min, continuamente se suministró un lavado con 5 mL de agua tridestilada, por último, se llevó a centrifugar con los mismos parámetros, el pellet recuperado fue resuspendido en 6 mL de agua tridestilada y llevado a un proceso de liofilización.

El tamaño, forma y los elementos estructurales de las SeNPs-CS se determinaron por TEM y EDS, utilizando un voltaje de aceleración de 100.0kV, se usó una rejilla con membrana de óxido de silicio y marco de cobre, la cual se impregnó por triplicado, el secado fue generado por convección. Los resultados se obtuvieron del equipo TEM Hitachi 7700 equipado con EDS. La evaluación referente a la distribución de tamaño fue producida usando las micrografías electrónicas obtenidas del TEM adjuntas al software ImageJ.

La determinación estructural y cristalina, de las SeNPs-CS, se logró a través de DRX, El análisis fue ejecutado con geometría Bragg-Brentano en un ángulo Θ -2 Θ , partiendo de los 5° hasta 80°, con un paso corto de 0.015 en un tiempo de 5 segundos, en el equipo Difractómetro BRUKER. Los patrones de difracción (Difractogramas estándar), correspondiente a cada elemento, fueron obtenidos de la base de datos en el software Match.

La caracterización química, mediada por FTIR, proporcionó los datos necesarios para la identificación de los grupos funcionales y enlaces de superficie en las SeNPs y SeNPs-CS, la confirmación de los enlaces covalentes, corresponde directamente a los picos más sobresalientes en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} . Los datos fueron generados por el Espectrofotómetro IR Affinity 1S Shimadzu.

4. Resultados y discusión

4.1. Caracterización del suelo e interpretación del análisis edafológico

El estudio sobre la calidad de suelo, características físico-químicas, se realizó en dos campos agrícolas dedicados a la producción de cebolla, la información adquirida de los productores, nos facilitó saber que cada campo realizaba prácticas para el control de plagas, dentro de las que se destacaron, el uso de controles biológicos, rotación de cultivos y adición de agroquímicos como fungicidas y fertilizantes. El 1er campo tenía un suelo con composición diferente, debido a esto se seccionó el dos partes, cada sección se tomó como un punto a examinar, en la tabla1, se identifican como: Mixtura 1, para el inicio y centro, mixtura 2, del centro al final del campo y mixtura 3 para el 2do campo agrícola.

Distinguido por una conductividad eléctrica (C.E.) baja, clasificamos al 2do campo como un suelo franco arcilloso semi alcalino no salino, con fuerte cantidad de CaCO_3 , en la tabla 2, se puede observar un déficit de NO_3 y baja cantidad de Zn que son de vital importancia para el desarrollo correcto de cebolla, seguido de muy bajas cantidades de Fe, Cu y Mn, altas concentraciones de CaCO_3 en los suelos, evitan la difusión correcta de estos iones^[SS], sin embargo la cantidad de K, Na, Ca, Mg son adecuadas manifestando estos valores en la capacidad de intercambio iónico (CIC) = 20.83 meq/100g, aun cuando las condiciones de los factores pH, NO_3 y Zn referentes al cultivo de cebolla varían según lo estipulado por diferentes autores, también depende de factores como la temporada, la variedad y densidad de plantas, las técnicas de cultivo, el tipo de suelo, el clima y las prácticas de riego[S3], sumado a que este tipo de cultivo es ligeramente tolerante a la acidez y alcalinidad del medio donde se desarrolla.[C3].

Lo que respecta a las diferencias de los dos primeros puntos, % materia orgánica, % CaCO_3 y una excesiva cantidad de NO_3 pueden deberse a que la mixtura 2, fue acondicionada con agroquímicos días antes del muestreo, posiblemente la mixtura 1 tubo el mismo tratamiento en semanas atrás. El primer punto se clasifico como suelo franco arcillo arenoso moderadamente alcalino, semi salino, con un % CaCO_3 y % de materia orgánica medio, destacando un déficit de Zn y bajo contenido de cobre, el segundo punto se clasifico como suelo franco arenoso moderadamente alcalino, semi salino con una fuerte concentración de CaCO_3 y niveles muy bajos de Zn, Cu y Mn. La fertilidad del suelo relacionada con al nitrógeno, fosforo y potasio denota un suelo fértil y apropiado para la producción de cebolla[s2].

Tabla 1. Análisis físico-químicos de importancia

Propiedades físico-químicas	Mixtura 1 Puntos (1,6,5)	Mixtura 2 Puntos (2,3,4)	Mixtura 3 Puntos (7,8,9)
pH 1:2 AGUA	7,74	7,83	8,15
C.E. ds/m	4,92	5,04	1,06
% Ca CO₃	3,00	4,00	más de 5
%Materia Orgánica	1,29	0,81	1,89
% SATURACION	45,0	31,0	48,0
Densidad gr/cm³	1,17	1,33	1,12
%Arena	59,09	73,09	35,09
% Limo	18,00	10,00	36,00
% Arcilla	22,91	16,91	28,91
Clasificación textural	franco arcillo arenoso	franco arenoso	franco arcilloso

Tabla 2. Determinación cuantitativa y porcentual de cationes involucrados en la capacidad de intercambio catiónico del suelo

Cationes	Mixtura 1 Puntos (1,6,5)	Mixtura 2 Puntos (2,3,4)	Mixtura 3 Puntos (7,8,9)
FOSFORO (ppm)	20,24	20,10	15,70
Fe(ppm)	6,22	9,16	8,616
Mn(ppm)	9,98	12,24	10,82
Zn(ppm)	0,70	0,54	1,04
Cu(ppm)	0,64	0,98	1,44
Ca(ppm)	2532	2862	3132
Mg(ppm)	222	336	396
Na(ppm)	241	315	251
K (ppm)	206	398	3
Se(ppm)	ND	ND	ND
CIC (meq/ 100g)	16,06	19,46	20,83

4.2 ar.

4.3 Identificación del microorganismo fitopatígeno

*Se realizó una conclusión previa del agente causal, debido a que tanto los productores de las hortalizas, así como los encargados de cosecharlas, reportaron una coloración rosada en las raíces. Basados en el protocolo de Levic J, et al 2012, se dispuso a realizar el primo aislamiento, partiendo de las raíces infectadas que fueron lavadas para asegurar la dilución microbiana y aislamiento del hongo más abundante, obtuvimos el crecimiento de 4 colonias diferentes, la más prolífica se muestra en la imagen # A), el periodo de purificación del hongo fue de 4 resiembras, al término del aislamiento, fue notorio la aparición de micelio aéreo, velloso y de color blanco con pigmentos rosáceos, consecuentemente, después de 8 días en crecimiento, las colonias cambiaron su morfología macroscópica, variando los colores entre ellas, tal como se ve en la imagen # B), las características microscópicas se reducen en la imagen # C), clamidosporas redondas intercalares y terminales, principalmente sencillas y dobles con pseudohifas hialinas y en sus alrededores cúmulos de blastosporas, los microconidios se caracterizaron por tener una ligera curvatura. Todas las características expuestas, coinciden con la presencia de *Fusarium Oxysporum f. sp.* [C8] Debido a los resultados, la pigmentación color rosa solo se debe de utilizar como indicativo de infección por hongos, esto facilita y acorta la búsqueda del agente fitopatógeno en las raíces [C9]. El hongo de la pudrición rosada normalmente se encuentra en la superficie de las raíces, el lavado por triplicado con agua destilada estéril, pudo ser el factor determinante en su aislamiento, ya que, de no ser lavadas las raíces, aún contaríamos con la presencia de este hongo, pero al contemplar que las raíces están en contacto con una gran cantidad de microorganismos, se hubiera dificultado el aislamiento. Si bien *Pyrenochaeta terrestris* es la principal causante de la pudrición rosa en las raíces de cebolla, este microorganismo se encuentra fuertemente asociado con otros fitopatógenos, uno de ellos es *Fusarium sp.*, en conjunto causan una compleja fitopatología radicular [C5]. Este complejo de fúngico invade la hortaliza a través de heridas o penetrando directamente a las raíces, causando enfermedades en cualquier etapa del desarrollo [C6], por sí solo, cualquiera de estos 2 hongos puede generar daño a las raíces. Tan estrecha es su relación que en conjunto *Pyrenochaeta terrestris* y *Fusarium sp.* Producen los daños más graves sobre este tipo de cultivo, el cual va desde la fase radicular hasta la basal, observándose la pudrición de la hortaliza desde la raíz hasta el bulbo, sumado a esto, ambos fitopatógenos tienen predilección por crecer en medio sólido PDA. [C7]*

4.4 Características primordiales en la síntesis de SeNPs y SeNPs-CS

En ambas síntesis se tomó como precursor una sal de selenio (selenito de sodio) y como agente reductor al ácido ascórbico, las relaciones molares utilizadas fueron de 1:4 respectivamente, el proceso de reducción se hizo evidente con un cambio de color en la solución, de incolora a naranja en un lapso de 15 min para las SeNPs, mientras que en las SeNPs-CS paso de un metacrilato opaco a un amarillo translúcido, es de importancia, agregar el agente reductor por goteo, mientras la solución con sales de selenio esta en movimiento constante, esto favorece la combinación de ambos reactivos, al término de 30 min, la presencia de ambas NPs es evidenciada por su tonalidad, tal como se muestra en la imagen # A) e B), la solución color rojo intenso o ladrillo, representa la formación de SeNPs, por otro lado, la existencia de SeNPs-CS es exhibida por una coloración naranja. Este tipo de síntesis se considera amigable con el medio ambiente, ya que la

molécula de ácido ascórbico es biocompatible, biodegradable y altamente soluble en agua. Su potencial reductor se fundamenta en el sistema de enlaces dobles conjugados que se encuentran en el par de grupos hidroxilo aunado a los del grupo funcional carbonilo y el anillo central que generan un comportamiento diferencial, como si se tratara de un ácido carboxílico con elevada polaridad (Se1). Estudios previos demuestran la capacidad de este agente para formar nanopartículas de selenio con formas esféricas y diámetros menores a los 100 nm, sin embargo, estas características no son reproducibles si se alteran las relaciones molares en la reacción de síntesis. (Se2). Mediante estequiometria se puede saber la relación molar exacta y producir SeNPs nanométricas, los resultados estequiométricos aseveran que el ácido ascórbico cede dos electrones, concluyendo en una relación molar de 2 para el AA y 1 para Na_2SeO_3 . (Se4)

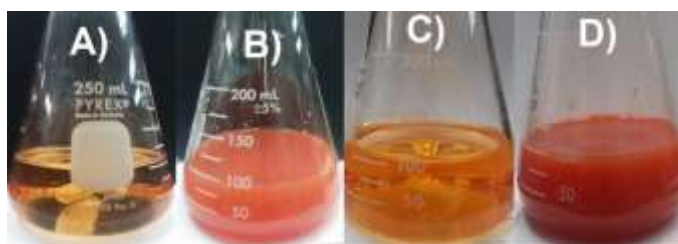


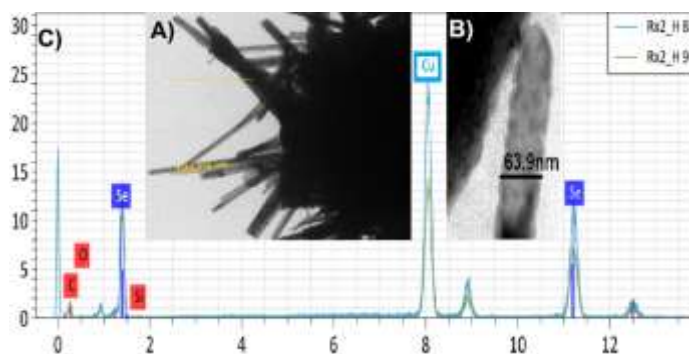
Imagen #. Proceso de reducción y formación de SeNPs y SeNPs-CS, A) Cambio de color a los 15 min en la reacción, síntesis de SeNPs-CS, B) Reducción de selenio a los 15 min sin estabilizante. C) Termino de síntesis SeNPs-CS reducción completa al termino de 30 min. D) SeNPs evidenciadas por el color rojo ladrillo, proceso de reducción a los 30 min.

El AA, no vuelve estables a las nanopartículas, al paso de 1 hora es posible observar los agregados rojizos al fondo de la solución Imagen #B), es necesario incorporar un agente estabilizante como la dextrina o CS, los cuales envuelven las SeNPs, promoviendo su dispersión por tiempos prolongados (Se2)., en el caso de las SeNPs-CS no se observan agregaciones de las SeNPs, pero si es evidente que con el paso del tiempo (5 días), las moléculas de CS formaran uniones puente entre las aminas primarias y los hidroxilos expuestos en su superficie dando lugar a agregados de CS, estas interacciones no involucran directamente la SeNPs, los posibles mecanismos de unión entre el SeO_3^{2-} y CS relacionan la interacción electrostática, entre la carga positiva de los grupos ($-\text{NH}_3^+$) y la carga negativa del selenito, inmovilizando al selenio y reduciéndolo adecuadamente,

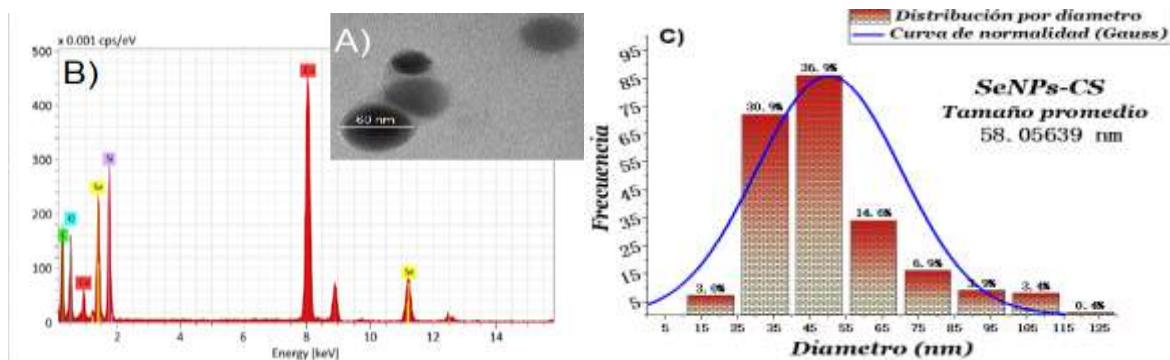
quedando integrado en el centro del complejo nanométrico de CS, las cargas positivas y superficiales de los grupos ($-\text{NH}_3^+$) benefician la dispersión en medios acuosos (Se3).

4.5 Análisis morfológico y elemental de SeNPs Y SeNPs-CS

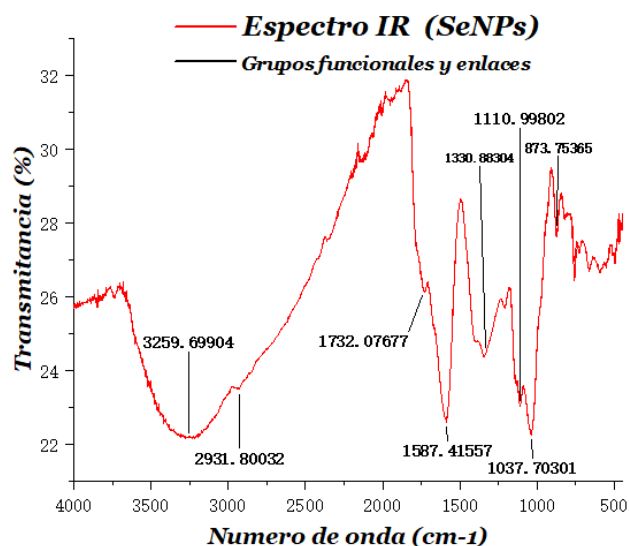
Caracterizamos morfológicamente las NP utilizando la técnica TEM, las SeNPs se organizaron en estructuras anchas y alargadas (nanobarras y/o nanofibras) tal como se muestra en la imagen $\text{RX2H \# A}$, las nanobarras de selenio (SeNBs) tienen una orientación aleatoria y sirven de anclaje para formar nuevas, en su mayoría, los autores aseguran obtener SeNPs esféricas, usando AA como reductor, sin embargo los procesos de transición amorfos dependen de diversos factores, por ejemplo, la molienda induce la licuefacción seguido de la solidificación de las SeNPs cristalinas [Se5], el proceso de secado sobre superficies de materiales amorfos (portaobjetos de vidrio y/o vidrios de reloj) favorece el crecimiento y elongación de las SeNBs [Se6], la orientación y forma se puede controlar a través de la temperatura, la cantidad de precursor y el tiempo de reacción, junto a esto, la velocidad alta de centrifugado juega un rol importante, favoreciendo la maduración y el crecimiento de todas las SeNBs [Se8][Se7]. En nuestro estudio, los principales factores que pudieron favorecer la transición amorfa fueron, el tiempo de sonicación en el tripe lavado, la preparación de la muestra para TEM y la velocidad de centrifugado, fracturando las SeNPs que consecutivamente se ordenaron en agregaciones unidireccionales, impulsando el incremento de tamaño y número de barras. El final de este cambio de fase, concluye con la unificación de todas las SeNPs esféricas, la imagen # B) demuestra las agregaciones sobre las SeNBs. La pureza de las SeNBs se expone en la imagen #C), del total de la muestra, el 79.10% corresponde a selenio, un 20.90% al carbono, los datos son característicos de este tipo de síntesis, el porcentaje de carbono se atribuye a los restos de grupos R, provenientes del AA y presentes en la superficie de las SeNBs [Se9][Se10].



Estabilizar las SeNPs con Cs, es una forma efectiva de inducir la dispersión y conservar la forma, en la imagen #A) se observan claramente estructuras circulares, aisladas y en conglomerados que van de 2 a 10 SeNPs, fácilmente se puede ver una capsula traslucida, generada por la cubierta de CS. La distribución de tamaño imagen# C) presenta un promedio de 58.05 nm. La unión de las SeNPs, se fundamenta en la unión electrostática entre los grupos (OH^-) y (NH_3^+) que se encuentran libres en la superficie y son los causantes de las nano agregaciones[Bai, K. et al 2020], por otro lado, tanto la concentración de CS en la síntesis, como los lavados semi ácidos bien ejecutados, se relacionan directamente con el tamaño final de las SeNPs[Abadi et al 2022], Las proporciones finales de los elementos involucrados se pueden ver en la imagen # B) el elemento selenio se manifestó en un 18%, muestras el 82% restante le fue asignado al carbón, los elementos Si y Cu se excluyeron de la cuantificación, ya que representan la composición de la rejilla utilizada para TEM. Las cantidades encontradas asemejan las expuestas por Sheikhalipour, M., et al 2023.



4.4 Estructura cristalina y grupos funcionales de interés en las SeNPs y SeNPs-CS



Mediante el espectro generado por FTIR, confirmamos los picos de absorción característicos para esta síntesis, iniciando, con un pico estrecho a los 3259 cm⁻¹, asignado a los estiramientos del grupo (O-H) que interacciona con la superficie de las SeNBs, a través de adsorción física, el pico que aparece a los 2931 cm⁻¹ nos refiere los estiramientos (C-H₂). aunque algunos autores mencionan que se debe al estiramiento de hidroxilo libre (HO-CH₂), en el número de onda 1732 cm⁻¹ representa la vibración de estiramiento y la poca proporción del grupo aldehído (H-C=O), por otro lado, las flexiones asimétricas (C-H) en los CH₂ Y CH₃, con enlace simple, se desplazaron a los 1587 cm⁻¹, ligeramente hacia la izquierda, en comparación a las referencias, posiblemente por la unión superficial a estructuras más complejas como las SeNBs, uno de los enlaces colgantes que se forma en la superficie de las SeNBs está posicionado a los 1330 cm⁻¹ y corresponde a la flexión secundaria del (OH) del grupo fenólico, sin embargo en otras publicaciones los autores aseguran, que el número de onda cercano a 1324cm⁻¹ junto al 1025cm⁻¹ y 1032cm⁻¹, son más apropiado para identificar las vibraciones por estiramiento del (C-O) que se encuentran acopladas entre sí. Finalmente, en el rango de los 1110cm⁻¹ y 873 cm⁻¹, se observan las vibraciones del carbón aromático y los enlaces (C-H) posicionados fuera del grupo fenólico. Con estos datos, y junto a los expuestos por diferentes autores, podemos afirmar que la producción de las SeNBs fue exitosa, además que los enlaces colgantes sobre la superficie de estas nanoestructuras favorecen la reactividad química a causa de una estrecha relación entre el aspecto morfológico y su masa.

5. Conclusiones

El suelo fue caracterizado en su mayoría como franco arenoso semi alcalino, con contenido adecuado de nutrientes para el desarrollo del cultivo, desafortunadamente el hongo causante de la pudrición rosa no pudo ser aislado correctamente, sin embargo la síntesis de SeNPs-CS se efectuó de la mejor manera y la caracterización coincide con las referencias expuestas.

6. Bibliografía

Las referencias deben indicarse dentro del texto principal como superíndice encerradas en corchetes ^[1] y ser numeradas consecutivamente en el orden que sean referidas.

1. Reveles Hernández, M., Velásquez Valle, R., Reveles Torres, L. R., & Cid Rios, J. Á. (2014). Guía para producción de cebolla en Zacatecas. Centro de Investigación Regional norte centro Campo experimental Zacatecas Calera, Zacatecas, México. ISBN: 978-607-37-0351-2.
2. Irassar E. F., Sulfate resistance of blended cement: Prediction and relation with flexural strength, Cem. Concr. Res. V. 20, 209–218 (1990).
3. Ficha técnica cemento clase H-HRS, www.holcimapasco.com.mx
4. Norma ASTM C1012 Length Change of Hydraulic- Cement Mortars exposed to a Sulfate solution.

Desarrollo de un flujómetro para la medición del gasto másico de contaminantes provenientes de motores de combustión interna

Lopes, J. ¹, Aguilar, H. Y. ¹, Vázquez, J. R. ¹, Esquivel, R. C. ², Vicente, W. ², González, R. ¹, Rincón, P. ¹, Hernández, M.A. ¹

¹ UNICE, Facultad de Ingeniería, UNAM

² Instituto de Ingeniería, UNAM.

jat.lop.rey.2809@gmail.com, yosef_1568@outlook.es, jricardovdd@gmail.com,
resquivelh@iingen.unam.mx, wwicenter@iingen.unam.mx, rog1950@unam.mx,
pirg@unam.mx, criaturaverde21@gmail.com

1. Resumen

La forma actual de evaluar las emisiones que producen los vehículos basados en motores de combustión interna en México puede mejorarse analizando la masa de contaminantes. Por ello se desarrolló un sistema para medir la masa de contaminantes provenientes de un motor de combustión interna. El sistema utiliza un anemómetro de

hilo caliente para medir el flujo de aire que ingresa al motor y sensores de engranes ovales para medir el consumo de combustible de este. Con la información obtenida de estos y un analizador de gases se realiza el cálculo de la masa de emisiones mediante un balance estequiométrico. Los resultados se comparan con un sistema certificado en la medición de emisiones y se obtiene un error menor al 17%.

2. Introducción

El problema de las emisiones provenientes de motores de combustión interna que terminan convirtiéndose en contaminantes atmosféricos ha tenido efectos a nivel mundial. Algunos efectos son visibles como la disminución de la calidad del aire en las grandes ciudades, hasta enfermedades crónicas respiratorias que desembocan en los decesos de la población ^[1]. Esto también indica una repercusión económica para las grandes naciones al tener que destinar recursos para el tratamiento de dichas afecciones. De acuerdo con el Banco Mundial se estima que los recursos destinados a cubrir los daños a la salud causados por la contaminación atmosférica ascienden a 8.1 billones USD anuales ^[2].

La predisposición de que dichas emisiones aumenten anualmente gracias a la demanda de sectores como el industrial, eleva la incidencia de repercusiones en el ambiente y la salud de la población. Esto obliga a las naciones a efectuar operaciones que tengan como objetivo la regulación y disminución de las principales fuentes de emisiones.

En el caso de la Unión Europea los vehículos con motores de combustión interna emiten el 60% de total de las emisiones contaminantes ^[3]. Para México, de acuerdo con el Inventario de Emisiones del año 2020^[4], el sector transporte emitió el 41% de PM₁₀, para PM_{2.5} el transporte aportó el 42 % así como también fue responsable de emitir compuestos de efecto invernadero como el CO₂ en un 61%.

Con el fin de mitigar la aportación de emisiones contaminantes por parte del sector transporte particular, en la Zona Metropolitana del Valle de México se implementa el Programa de Verificación Vehicular (PVV) ^[5]. Este se basa en las NOM-041-SEMARNAT-2015^[6], NOM-050-SEMARNAT-2018^[7] y NOM-167-SEMARNAT-2017^[8]. Que establecen los límites máximos de concentraciones de contaminantes para los vehículos de motores de combustión interna. De acuerdo con estos, los límites están establecidos como concentraciones de HC (Hidrocarburos), CO (Monóxido de carbono), NO_x (Óxidos de Nitrógeno) y O (Oxígeno).

En cambio, para la Unión Europea es la EURO 6 que tiene como finalidad reducir las emisiones contaminantes provenientes de vehículos de motores de combustión interna en Europa, se basa en la medición de la masa de contaminantes ^[9].

Al comparar la concentración volumétrica de acuerdo con el PVV aplicado en México puede cometerse el error de que, por ejemplo, un vehículo con un motor grande

pueda producir la misma concentración de contaminantes que un vehículo con un motor de menores dimensiones.

Aquí la masa de contaminantes haría la distinción de que el motor genera una cantidad de emisiones mayor que el pequeño, es decir que este contamina más y radicaría la importancia de analizar la masa de contaminantes de los motores en vez de las concentraciones en el escape de los vehículos ^[10].

El presente trabajo busca servir de base para el desarrollo de un sistema que mida la masa de contaminantes provenientes de un motor de combustión interna, conformado por sensores en el sistema de admisión de aire y en el sistema de suministro de combustible del mismo, que junto con cálculos y balances estequiométricos se compararan con los datos obtenidos por un sistema certificado.

3. Condiciones experimentales

3.1 *Calculo de la masa molar y del gasto másico de la mezcla seca*

Para calcular la masa de contaminantes requerimos conocer la masa de la mezcla de gases que expulsa el motor m_M . Dicha masa se calcula a partir de la masa del consumo de combustible del motor m_f y la masa de aire que ingresa al mismo m_a :

$$m_M = m_a + m_f \quad (1)$$

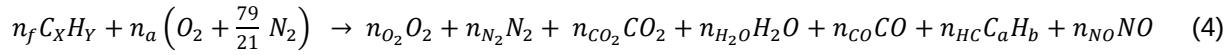
Se debe considerar que los analizadores de gases secan la muestra que obtienen del motor, por lo que se debe restar la masa de vapor de agua m_{H_2O} a la masa total de los gases calculada m_M :

$$m_D = m_M - m_{H_2O} \quad (2)$$

Conociendo la masa de gases secos m_D , la masa molar de la mezcla de gases secos M_D , la concentración C_C y la masa molar M_C de un contaminante, se calcula la masa de cada contaminante m_C :

$$m_C = m_D C_C \frac{M_C}{M_D} \quad (3)$$

La masa de vapor de agua se estima a partir del balance estequiométrico de la combustión (Ecuación 4) y la masa molar del agua M_{H_2O} (Ecuación 5):



$$m_{H_2O} = n_{H_2O} M_{H_2O} \quad (5)$$

Del balance estequiométrico (Ecuación 4) se obtienen las siguientes dos ecuaciones:

$$\frac{158}{21} n_a = 2 n_{N_2} + n_{NO} \quad (6)$$

$$2 n_a = 2 n_{O_2} + 2 n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{CO} + n_{NO} \quad (7)$$

Los moles de aire n_a se calculan a partir de la masa de aire medida durante un segundo por el anemómetro de hilo caliente m_a y la masa molar del aire M_a :

$$m_a = n_a M_a \quad (8)$$

Los moles de O_2 , CO_2 , CO , NO_x y HC (n_c) se calculan a partir de las concentraciones medidas por el analizador de gases C_c y los moles de la mezcla de gases secos n_D :

$$C_c = \frac{n_c}{n_D} \quad (9)$$

Donde:

$$n_D = n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO_2} + n_{CO} + n_{HC} + n_{NO} \quad (10)$$

La masa molar de la mezcla de gases secos se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$M_D = \frac{n_{O_2} M_{O_2} + n_{N_2} M_{N_2} + n_{CO_2} M_{CO_2} + n_{CO} M_{CO} + n_{HC} M_{HC} + n_{NO} M_{NO}}{n_D} \quad (11)$$

A partir del sistema de trece ecuaciones (Ecuaciones 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11) y trece incógnitas (m_M , m_D , m_{H_2O} , M_D , n_D , n_a , n_{O_2} , n_{N_2} , n_{CO_2} , n_{H_2O} , n_{CO} , n_{HC} , n_{NO}) previamente descrito, se calcula m_D y M_D . Posteriormente, a partir de la Ecuación 3 se calcula la masa de cada contaminante.

3.2 Diseño del sistema propuesto

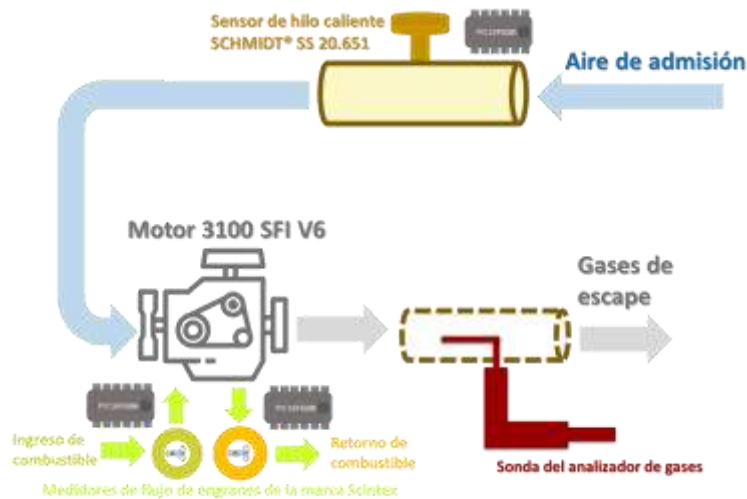


Figura 1. Diagrama general del sistema propuesto

En la Figura 1 puede apreciarse un esquema simplificado de la conexión del motor 3100 SFI V6^[11] con el sistema de sensores y el analizador de gases.

El motor utilizado corresponde al 3100 SFI V6, este cuenta con un desplazamiento volumétrico de 3.1 litros y un sistema de inyección de combustible secuencial. Posee una potencia máxima de 160 HP a 5200 r.p.m, con un par máximo de 185 lb ft a 4000 r.p.m

En la entrada del sistema de admisión de aire hacia el motor se colocó un anemómetro de hilo caliente marca SCHMIDT® SS 20.651^[12]. Este sensor indica la velocidad del aire de admisión mediante una salida digital cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad medida por el anemómetro. La frecuencia f_a es leída en Hz por un microcontrolador PIC16F628A^[13] que calcula la velocidad estándar del aire de admisión v_s en m/s mediante la Ecuación 12. Se requiere conocer la velocidad máxima que puede medir el anemómetro de hilo caliente, la cual es 20 m/s, así como la frecuencia máxima que puede medir el anemómetro de hilo caliente que es 100 Hz.

$$v_s = f_a \frac{20}{100} \quad (12)$$

Para obtener la masa de aire en la admisión m_a , se utiliza la Ecuación 13, donde el diámetro del tubo de admisión al motor D tiene un valor de 0.0762 m, la presión estándar P_s equivale a 101 325 Pa, la constante particular del aire R_a tiene un valor de 287.05 $\frac{J}{kg K}$ y la temperatura estándar T_s de 293.5 K.

$$m_a = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 v_s P_s}{R_a T_s} \quad (13)$$

A su vez se registra el consumo de combustible del motor mediante sensores de flujo de combustible volumétricos de engranes ovalados de la marca Scintex® [14], cuyo rango de operación se encuentra entre 20 y 300 L/h. Estos funcionan con una conexión NPN de colector abierto que produce una señal digital cuya frecuencia es proporcional al flujo volumétrico. Para medir el consumo instantáneo de combustible se obtiene la diferencia del flujo de la línea de salida de la bomba de combustible con la línea de retorno hacia el tanque de combustible.

La señal digital anteriormente mencionada es ingresada a un microcontrolador PIC16F628A el cual calcula el flujo del consumo de combustible del motor m_f mediante la frecuencia f_c obtenida por el microcontrolador en Hz y el número de pulsos del sensor por litro N_p . El valor de N_p que corresponde a la línea de salida es 2080 pulsos/L y el de la línea de retorno es 2676 pulsos por litro:

$$m_f = f_c \frac{3600}{N_p} \quad (14)$$

La información del anemómetro de hilo caliente y los sensores de flujo de combustible, se guardan en un documento Excel (ver Tabla 1) con la información de la hora y fecha en que se realizó la prueba, así como los datos obtenidos por los sensores para el posterior análisis de información.

Tabla 1. Muestra del formato del sistema propuesto

Fecha y hora	Flujo de ida [litro/hora]	Flujo de retorno [litro/hora]	Consumo [litro/hora]	Velocidad del aire de ingreso [m/s]	Gasto másico [g/s]
11/07/2024 02:37:10 p. m.	X	X	X	X	X
11/07/2024 02:37:10 p. m.	X	X	X	X	X
11/07/2024 02:37:11 p. m.	X	X	X	X	X

Finalmente, en el escape del motor se conecta la sonda del analizador de gases.

3.3 Sistema VMAS para validar cálculos

El sistema de análisis de masa de contaminantes de vehículos VMAS® ^[15] (Vehicle Mass Analysis System) con el que cuenta la Unidad de Investigación y Control de Emisiones (UNICE) es con el que se compararon los datos obtenidos con el sistema propuesto. El sistema VMAS® es capaz de medir las concentraciones netas, el flujo del escape en dilución, así como la relación de dilución y, a su vez realiza, los cálculos para obtener la masa de CO, CO₂, NO_x y HC emitidas por un motor o vehículo. Este sistema, además, guarda los datos cada segundo para un análisis posterior.

3.4 Banca analizadora de gases

El sistema del analizador de gases con la que cuenta el VMAS® es una micro banca automotriz de marca Sensors® modelo AMB II, utiliza sensores infrarrojos no dispersivos (NDIR) para medir las concentraciones volumétricas de CO, CO₂ y HC. Además, cuenta con sensores electroquímicos para la medición del O₂ y NO_x, con los cuales se tiene una banca capaz de medir cinco gases, estos son requeridos para el PVV en México y a nivel mundial.

La banca AMB II puede medir concentraciones máximas de 15% para el CO, 20% para el CO₂, 2000 ppm de HC, 4000 ppm Propano, 25% para el O₂ y 5000 ppm para NO_x.

Los intervalos de medida de emisiones de la banca son las que se aprecian a continuación (Ver Tabla 2):

Tabla 2. Especificaciones de rango y exactitud de la banca analizadora de gases

Emisión	Rango	Exactitud
HC	0-2000 ppm	$\pm 3\%$
	2001 – 5000 ppm	$\pm 5\%$
	5001 – 9999 ppm	$\pm 10\%$
CO	0 – 10%	$\pm 3\%$
	10.1 – 14%	$\pm 5\%$
CO ₂	0-16%	$\pm 3\%$
	16.1%- 18%	$\pm 5\%$
NO	0 – 4000 ppm	$\pm 4\%$
	4001 – 5000 ppm	$\pm 8\%$
NO ₂	0 – 400 ppm	$\pm 4\%$
	401- 500 ppm	$\pm 8\%$
O ₂	0 – 25%	$\pm 5\%$

3.5 Flujómetro

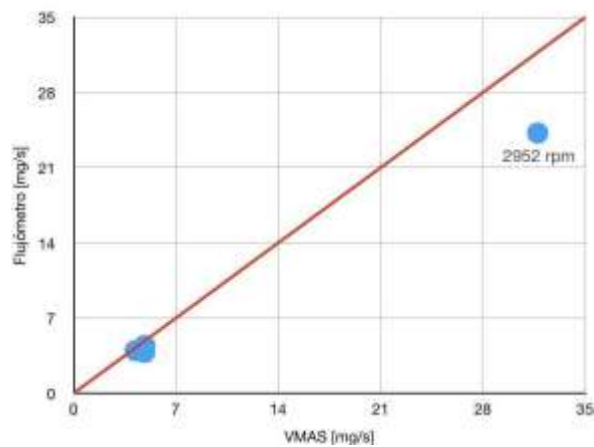
Otro sistema con el que cuenta el VMAS® es un flujómetro EFM4^[15] con un intervalo de temperatura de operación que va de -5 a 500 °C y una exactitud de $\pm 2\%$. El intervalo de flujo a 100 °C es de 30.7 kg/h a 2080 kg/h. A 400 °C es de 46.3 kg/h a 1550 kg/h.

4. Resultados y discusión

Cada prueba se realizó en el régimen de velocidad más cercano a 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 r. p. m.

Obteniendo las lecturas correspondientes del sistema propuesto y el VMAS®, se obtuvieron los resultados presentes en las siguientes gráficas de paridad.

a)



b)

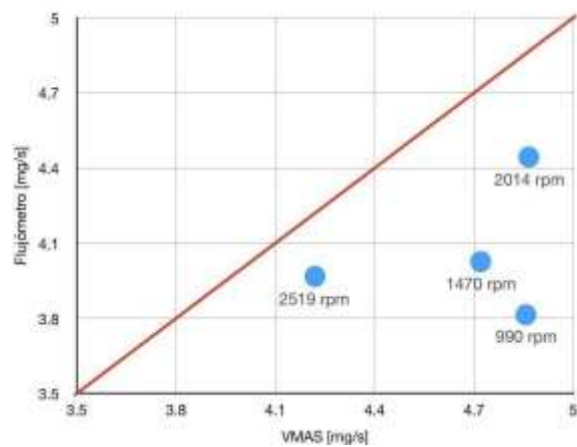
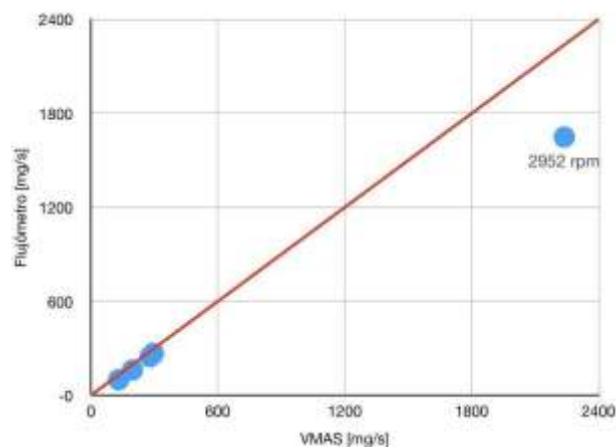


Figura 2. Comparación de emisiones de HC entre VMAS® y el sistema propuesto: a) HC en todos los regímenes de operación del motor y (b) detalle en los regímenes de menor valor de HC

En la Figura 2 se aprecia que el HC indica una relación entre el sistema propuesto y el VMAS® donde el error promedio corresponde a 1.99 mg/s y el error relativo corresponde al 14.9%.

a)



b)

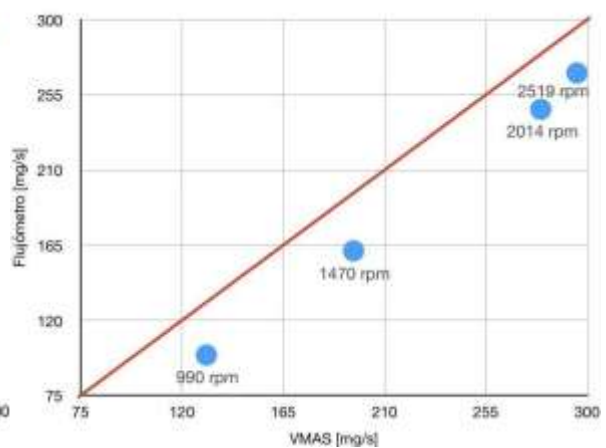


Figura 3. Comparación de emisiones de CO entre VMAS® y el sistema propuesto: a) CO en todos los regímenes de operación del motor y (b) detalle en los regímenes de menor valor de CO

En la Figura 3 se aprecia que el CO indica una relación entre el sistema propuesto y el VMAS® donde el error promedio corresponde a 143.02 mg/s y el error relativo corresponde al 17.85%.

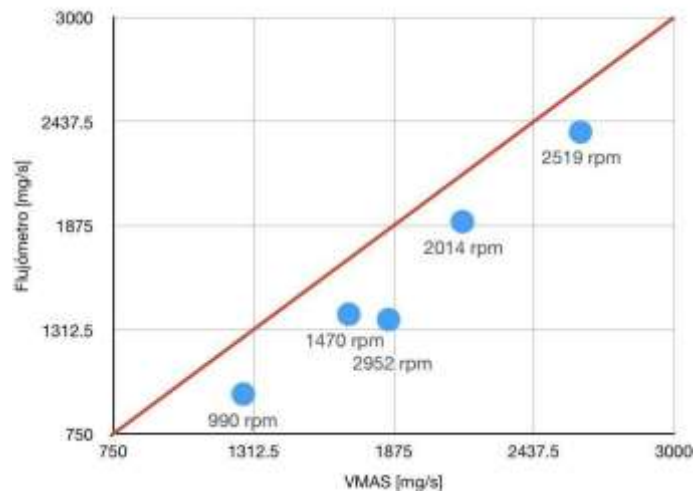


Figura 4. Comparación de emisiones de CO_2 entre VMAS® y el sistema propuesto

En la Figura 4 se aprecia que el CO_2 indica una relación entre el sistema propuesto y el VMAS® donde el error promedio corresponde a 318.62 mg/s y el error relativo corresponde al 17.86%. En esta se aprecia cómo los regímenes se distribuyen, teniendo un comportamiento entre los 750 mg/s y 3000 mg/s , sin acercarse al 0 mg/s como en los casos anteriores.

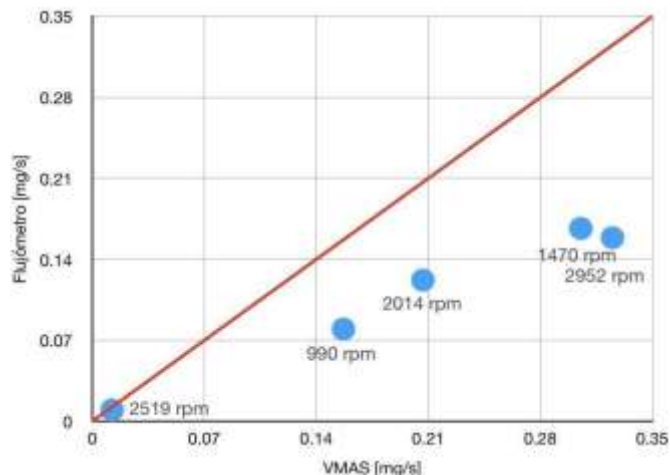


Figura 5. Comparación de emisiones de NO entre VMAS® y el sistema propuesto

En la Figura 4 se aprecia que el NO indica una relación entre el sistema propuesto y el VMAS® donde el error relativo corresponde al 41.43%. Es el único contaminante que muestra un error mayor al 17%. Esto puede deberse a que el VMAS mide NO_x , que es la suma de NO_2 y NO, a comparación del sistema propuesto que únicamente contempla NO.

5. Conclusiones

Las emisiones medidas mediante el sistema propuesto tienen errores entre el 14.9% y 17.86% con respecto a las medidas por el VMAS®. Este error no es despreciable y se observa que el método propuesto subestima la producción real de emisiones emitidas por el motor de combustión interna. Estos errores pueden deberse a errores en la medición del flujo de aire, del flujo de combustible o bien, el balance estequiométrico propuesto sobreestima la producción de vapor de agua de los gases escape que realmente se producen. En un trabajo a futuro se debe añadir y contemplar más compuestos en el balance estequiométrico que se resuelve, donde pueda incluirse la composición real de la gasolina, la humedad de aire de admisión al motor y una mayor cantidad de compuestos en la mezcla de gases en la salida.

Para tratar el error de NO obtenido por parte del sistema propuesto, se debe agregar el compuesto NO_2 al balance estequiométrico para calcular los NO_x generados, es decir asemejarse al sistema del VMAS.

Se concluye que el sistema propuesto actualmente para el cálculo de las masas de contaminantes, permite evaluar con errores menores al 20% las emisiones de CO_2 , CO, y HC, sin embargo, para añadir reducir este error, se deben agregar más consideraciones y elementos al sistema calculado.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo que nos brindó la DGAPA a través del Proyecto PAPIIT IG 100 222 "Modificaciones estimadas del parque vehicular en la Ciudad de México hacia las décadas 30's y 40's, así como su impacto en las emisiones de contaminantes

atmosféricos criterio y gases de efecto de invernadero” y al proyecto GII “Intensificación de los procesos para la obtención de biocompuestos a partir de agua residual”.

6. Bibliografía

1. Instituto Nacional de Ecología y Cambio, C. (25 de Julio de 2024). *Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA*. Obtenido de <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2019.pdf>
2. Banco Mundial. (1 de septiembre de 2022). *Grupo Banco Mundial*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/09/01/what-you-need-to-know-about-climate-change-and-air-pollution>
3. Parlamento, E. (14 de junio de 2022). *Temas Parlamento Europeo*. Obtenido de Emisiones de CO₂ de los coches: hechos y cifras: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
4. SEDEMA. (11 de agosto de 2023). *SEDEMA*. Obtenido de Inventario de Emisiones del año 2020: Inventario de Emisiones del año 2020. Obtenido de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2020/inventario-emisiones-cdmx-2020.pdf>
5. SEMARNAT. (15 de Julio de 2024). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Obtenido de Programas de verificación vehicular PVV: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-verificacion-vehicular-pvv>
6. Secretaría de Medio Ambiente y, R. (2015). NOM-041-SEMARNAT-2015. *Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible*. Mexico.
7. Secretaría de Medio Ambiente y, R. (2018). NOM-050-SEMARNAT-2018. *Que establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos*. Mexico.
8. Secretaría de Medio Ambiente. (2017). NOM-167-SEMARNAT-2017. *Que establece los límites máximos permisibles*. Mexico.
9. Pérez, S. M. (noviembre de 2023). Normas Euro 7 sobre las emisiones de los vehículos de motor.
10. Lopez, E. (15 de abril de 2016). *Ciencia UNAM*. Obtenido de [https://ciencia.unam.mx/leer/551/La forma de medir los contaminantes de vehiculos es la correcta](https://ciencia.unam.mx/leer/551/La%20forma%20de%20medir%20los%20contaminantes%20de%20vehiculos%20es%20la%20correcta)
11. Duran, O. (24 de marzo de 2023). *Descubre todo sobre el potente motor 3100 SFI V6 del Malibu*. Obtenido de HIFERAUTO.ES: https://hiferauto.es/motor/motor-3100-sfi-v6-malibu/?expand_article=1
12. SCHMIDT Technology, G. (2024). *SCHMIDT® Flow Sensor SS 20.651 Instructions for use*. Obtenido de https://www.schmidttechnology.de/wp-content/uploads/wpallimport/files/api_files_en/downloads/Instruction_for_Use-SS20651-547608_02D.pdf
13. Microchip Technology, I. (2024). *Microchip*. Obtenido de <https://www.microchip.com/en-us/product/pic16f628a>
14. Scintex. (2024). *Scintex*. Obtenido de <https://www.scintex.com.au/collections/gauges-sensors/products/engine-fuel-flow-meter-pulse?variant=31170270915>
15. Sensors. (2024). *Sensors*. Obtenido de https://sensors-inc.com/Portals/0/brochures/MD-VMAS-brochure_v3_c2020.pdf

Determinación de ^{14}C en aerosoles atmosféricos en puertos marítimos. Influencia de combustibles fósiles.

Hernández-Rangel, A.K.,¹ Solís, C.,² Ortiz-Romero, E.,¹ Rodríguez Ceja,

M.², Martínez, M. A.,³Álvarez, H.O.,³ Reynoso-Cruces, S.³

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas.
Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200. México.

²Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, México City C.P.04510, México

³Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México City C.P.04510, México

al2233802716@azc.uam.mx
corina@fisica.unam.mx
meorv@azc.uam.mx
mangel@ciencias.unam.mx
harry02co@gmail.com
maria@fisica.unam.mx
reynoso@ciencias.unam.mx

1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue emplear la determinación de radiocarbono (^{14}C) mediante espectrometría de masas con aceleradores (AMS por sus siglas en inglés) para identificar las fuentes fósiles y no fósiles de aerosoles atmosféricos en puertos marítimos. Se analizaron otros parámetros para comprender la composición de los aerosoles y estudiar las fuentes de los compuestos presentes en la fracción $\text{PM}_{2.5}$.

2. Introducción

El aumento de la actividad vehicular e industrial en México ha incrementado la contaminación ambiental en el aire, suelo y agua. En la atmósfera, los contaminantes y las rápidas reacciones químicas entre gases y partículas atmosféricas (PM) tienen un impacto negativo inmediato sobre el ambiente y la salud. Se han realizado numerosos estudios científicos sobre la composición y fuentes de gases y PM, destacando la importancia de conocer la química atmosférica y las actividades humanas y fenómenos naturales que alteran la atmósfera ^[1].

Las partículas atmosféricas, que incluyen aerosoles carbonosos formados por carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC), son una mezcla de diferentes contaminantes

Existen estudios que evalúan las fuentes emisoras de PM, como las actividades industriales y de transporte, y se han desarrollado modelos teóricos que permiten entender la dinámica y origen de estas partículas ^[2].

El análisis de radiocarbono (^{14}C) en aerosoles ayuda a identificar el origen de las partículas atmosféricas, diferenciando entre fuentes fósiles y no fósiles, ya que los aerosoles de origen fósil no contienen ^{14}C , mientras que los no fósiles (biogénicos) presentan una abundancia de ^{14}C similar a la concentración de este elemento en la atmósfera ^{[3][4]}. Esto convierte al ^{14}C en una herramienta ideal para determinar la contribución de las fuentes de aerosoles carbonosos ^[2].

Los puertos marítimos, como el puerto de Veracruz, Ver., (figura 1) son fuentes significativas de contaminación debido a sus intensas actividades comerciales y operaciones portuarias. Además, a menudo los combustibles empleados por los barcos son de mala calidad, lo que provoca mayores emisiones de PM.



Puerto de Veracruz

Fuente: <https://cdn.britannica.com/35/155735-050-46AB85DF/Cargo-ship-port-Coatzacoalcos-Mexico-Veracruz.jpg>

2.1 Carbono moderno y carbono fósil

Los aerosoles carbonosos, están constituidos por partículas de carbono OC y EC principalmente. El EC (conocido también como carbono negro), contiene principalmente carbono fósil emitido por la quema de combustibles fósiles. El OC incluye carbono proveniente de aerosoles orgánicos primarios y secundarios. Los primarios son emitidos directamente a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles y biocombustibles, así como incendios forestales y emisiones biogénicas (polen y esporas, suspensión de suelos y emisiones del mar). Los aerosoles secundarios provienen de reacciones químicas y conversión gas-partícula de compuestos orgánicos volátiles en fase gaseosa. El OC está dominado por carbono contemporáneo (carbono moderno) mientras que el EC está dominado por carbono fósil. Se considera que todo el carbono fósil es antropogénico^{[6][2]}, ^[7].

2.2 Relevancia del carbono en la atmósfera

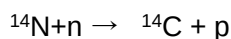
El ciclo del carbono consiste en el intercambio de átomos de carbono entre el océano, el suelo y la atmósfera, a través de factores físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, a partir de la Revolución Industrial éste se ha visto afectado por la actividad antropogénica. Al utilizar el carbono fósil como fuente de energía se ha incrementado significativamente la concentración de CO₂ en la atmósfera^[8].

Los compuestos de carbono de los aerosoles presentan las siguientes características: a) absorben la luz en un amplio espectro. Al absorber luz en la región ultravioleta y longitudes de onda corta, contribuyen al forzamiento radiativo^[9]. b) Su forma no se altera a altas temperaturas, c) son insolubles en agua; solventes orgánicos y otros compuestos de aerosoles atmosféricos, d) afectan la fotoquímica de la atmósfera y las concentraciones de ozono troposférico, e) contribuyen al enfriamiento de la Tierra al producir un efecto de apantallamiento de la luz, f) Tienen baja reactividad química en la atmósfera, g) Intervienen en el proceso de formación de nubes y, por tanto, en la lluvia y la nieve h) Influyen negativamente en el ciclo natural del carbono y, por ende, en el cambio climático^[10].

2.3 Formación y reparto del ¹⁴C

El ¹⁴C se forma en la estratósfera por la interacción de los rayos cósmicos con el Nitrógeno, que constituye el 78% del aire. Los rayos cósmicos, están compuestos por protones en un 89% , de partículas alfa 9% e electrones 1%, inciden sobre la Tierra desde el espacio exterior a altas energías que van desde los 10 a 100 MeV (comparado con los 8 MeV de energía de enlace de los nucleones)^{[11][12]}. Las colisiones de los rayos cósmicos sobre los núcleos de los gases de la atmósfera se fragmentan generando un cúmulo de partículas secundarias, entre ellas neutrones. La interacción

de estos neutrones con las moléculas de nitrógeno da lugar a la formación del ^{14}C , mediante la siguiente reacción ^[4]:



El ^{14}C en aerosoles nos proporciona información sobre el origen de las partículas atmosféricas; permite hacer una separación entre fuentes de origen fósil y no fósil (contemporáneas o modernas) ^{[3][4]}.

2.4 Puertos marítimos como fuentes de contaminantes

Los puertos marítimos pueden ser fuentes significativas de contaminación debido a diversas actividades asociadas con el transporte marítimo y las operaciones portuarias. Algunos de los factores que contribuyen al nivel de contaminación en los puertos marítimos son emisiones de buques, tráfico terrestre, manipulación de carga, vertidos de aguas residuales y residuos sólidos. Estas emisiones y residuos sólidos son generados en el lugar donde embarcan representando un gran impacto en el ambiente.

En el caso de México, un estudio realizado por la Comisión para la Cooperación Ambiental de Norte América en 2011 dio como resultado que el 77% de los gases de efecto invernadero emitidos provenían de diez puertos entre los cuales resaltan el de Cayo Arcas, seguido de Manzanillo, Veracruz y Altamira ^[13].

Debido a la influencia de los puertos marítimos en el transporte de mercancías y al tráfico asociado a la quema de combustibles fósiles, se ha generado un interés por conocer como estas actividades influyen en el aumento de OC y EC, provocando grandes cantidades de partículas con diversos contenidos que pueden afectar tanto el ambiente como la salud, así como afectar a la temperatura global del planeta provocando calentamiento global. La justificación para el muestreo y análisis con ^{14}C de aerosoles atmosféricos en el puerto de Veracruz, Ver., se fundamenta en varios puntos críticos y relevantes para la investigación ambiental y climatológica.

El propósito de este estudio se centra en determinar las proporciones de carbono moderno y fósil en la fracción $\text{PM}_{2.5}$ en aerosoles de la zona costera de Veracruz, con la finalidad de identificar y cuantificar las contribuciones de fuentes biogénicas y fósiles a la contaminación atmosférica local. El Puerto de Veracruz es uno de los más importantes del país, con muchas rutas comerciales en el Océano Atlántico. En 2023 el movimiento total de carga por tráfico fue de 34.534 millones de toneladas movilizadas por un total de 2306 buques.

3. Condiciones experimentales

Se realizó un muestreo de partículas finas en una campaña en el puerto de Veracruz. Las muestras se colectaron cada 24 horas durante un periodo de 14 días entre mayo y junio de 2023.

Con las muestras obtenidas se determinó la concentración de ^{14}C y CT. El ^{14}C se determinó con AMS se determinó el CT por medio de combustión en el equipo de analizador de elementos. Los resultados obtenidos de las muestras se analizaron con estadística básica.

3.1 Metodología de muestreo de $\text{PM}_{2.5}$

Equipamiento de muestreo para los filtros de cuarzo: se utilizó un muestreador de alto volumen de $\text{PM}_{2.5}$ con un caudal de $1.9 \text{ m}^3/\text{min}$, equipado con filtros de cuarzo Pallflex 2500 de $20 \times 25 \text{ cm}$ (QAT-UP; Pall Sciences, Ann Arbor, MI, EE. UU.). Previamente a su uso, los filtros de cuarzo fueron sometidos a un proceso de combustión en una mufla a 600°C durante 6 h para eliminar posibles contaminantes orgánicos en el filtro.

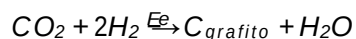
3.2 CT en los aerosoles

Para obtener el CT de cada filtro, se toma una pequeña muestra del filtro (aproximadamente 1 cm^2) y se pesa en un crisol de estaño para posteriormente entrar en combustión a 950°C en el equipo analizador elemental (AE) (Vario Microcube). Este AE determina con su propio software el contenido de carbono total del filtro.

3.3 Conversión del carbono a grafito para el análisis de ^{14}C

La conversión de carbono contenido en los filtros de aerosoles a grafito se realiza en un equipo automatizado de grafitización (AGE III Ion Plus). Una porción del filtro (correspondiente a 150 a 300 microgramos de carbono) se somete a la combustión en el AE a 950°C . El CO_2 se transporta mediante un flujo de helio hasta los reactores de grafitización AGE III (mostrado en la figura 1), que es totalmente controlado por la computadora a la que se encuentra conectado.

El CO_2 llega a un tubo del reactor al que previamente se le añadieron 5 mg de hierro que funciona como catalizador de la reacción y se agrega hidrógeno. Una vez que todos los reactores tienen su CO_2 e H_2 correspondiente, se calientan los reactores para producir la formación de grafito. El carbono en forma de grafito se deposita sobre el Fe catalizador y el agua formada se congela en la parte superior del reactor mediante la siguiente reacción:



Se obtiene así el grafito que va a ser prensado en un cátodo de aluminio para ser introducido al AMS.



Figura 1. Grafitizador AGEIII (fuente: Instituto de Física de la UNAM).

3.4 Análisis por AMS

El Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores del Instituto de Física de la UNAM cuenta con un acelerador Tandem de 1 MV de la empresa High Voltage Engineering Europe (figura 2). En este equipo es posible analizar, además del ^{14}C , otros radioisótopos cosmogénicos como el berilio-10, aluminio-26, yodo-129 y plutonio.

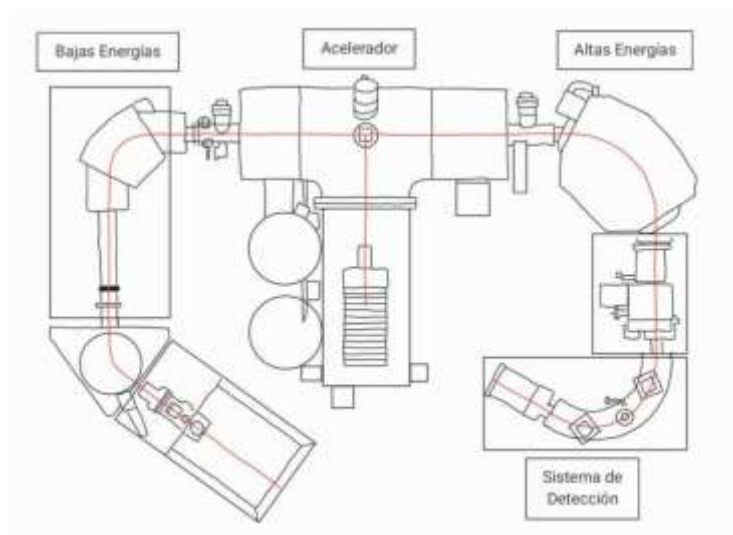


Figura 2. Diagrama correspondiente al sistema de AMS HVEE 1MV (fuente: Instituto de Física de la UNAM).

3.5 Cuantificación de ^{14}C

Para el análisis de AMS, se realiza una medición directa de los cocientes $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ y $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de las muestras en forma de grafito. En el carrusel de 50 posiciones, se introducen 4 cátodos del estándar primario (ácido oxálico HOx_2 NIST 4990C) cuya concentración absoluta se conoce). También se incluyen 2 o 3 estándares secundarios de concentración de ^{14}C conocida que se preparan junto con las muestras desconocidas. También se preparan como cualquier muestra, blancos (que no contienen ^{14}C).

A partir de los cocientes $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ se calcula la Fracción Moderna (F_m o $F^{14}\text{C}$), que mide la desviación del cociente $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de una muestra del valor "Moderno" (el valor moderno corresponde al cociente $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de una muestra en el año 1950 de nuestra Era):

$$F^{14}\text{C} = (^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{muestra}} / (^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{1950}$$

El porcentaje de carbono moderno (pMC) es $F^{14}\text{C} \times 100$ expresado en %. El valor del pMC en aerosoles refleja el tipo de emisiones de un sitio. La fracción de carbono biogénico y fósil contenido en los aerosoles se puede conocer utilizando el propio pMC, CT y un factor de corrección f :

$$\text{Carbono Biogénico (BC)} = (\text{pMC}_{\text{muestra}} / 100 \times \text{CT}) \times f$$

$$\text{Carbono Fósil (FC)} = \text{CT} - \text{BC}$$

Donde $f = 1/\text{pMC}_{\text{biósfera}}$ en el año en que se efectúa la medida. El valor $\text{pMC}_{\text{biósfera}}$ corresponde al valor de la materia orgánica formada en el año de la colecta de los aerosoles y es necesario para estimar el carbono de la biomasa ^[14].

4. Resultados y discusión

En la tabla 1 y en la figura 2 se muestran los resultados obtenidos de la fracción de ^{14}C moderno ($F^{14}\text{C}$) del CT, así como los porcentajes de carbono biogénico (BC) y carbono fósil (FC) para el puerto de Veracruz en la estación cálida seca, los valores obtenidos

muestran un aporte importante de FC. Puede observarse que el aporte de las emisiones fósiles superan en ocasiones a la componente biogénica.

Tabla 1. Resultados obtenidos del muestreo llevado a cabo de mayo a junio de 2023 en el puerto de Veracruz.

Fecha de la muestra	F ¹⁴ C	TC	BC (%)	FC (%)
23/05/2023	0.4469	0.45	11.8	14.6
24/05/2023	0.4607	0.46	8.8	10.3
25/05/2023	0.3700	0.37	1.3	2.3
26/05/2023	0.5885	0.59	24.1	16.9
27/05/2023	0.3849	0.38	18.9	30.2
29/05/2023	0.5450	0.55	16.9	14.1
30/05/2023	0.4919	0.49	6.1	6.3
31/05/2023	0.5157	0.52	9.8	9.2
01/06/2023	0.3935	0.39	2.9	4.5
02/06/2023	0.3539	0.35	3.1	5.6
03/06/2023	0.5354	0.54	17.4	15.1
05/06/2023	0.4282	0.43	14.6	19.5
06/06/2023	0.4364	0.44	16.9	21.8
07/06/2023	0.5132	0.51	6.5	6.2

La tabla 2 muestra una comparación entre los valores promedio de F¹⁴C para los puertos de Veracruz y La Habana y otras muestras colectadas en diferentes años en zonas urbanas en las cuales se observa, en particular en Beijín y CDMX (en la zona centro) que

el aporte de la fracción de carbono moderno es de 0.34 y 0.43; lo que indica que las fuentes de origen fósil son mayores que las de carbono moderno.

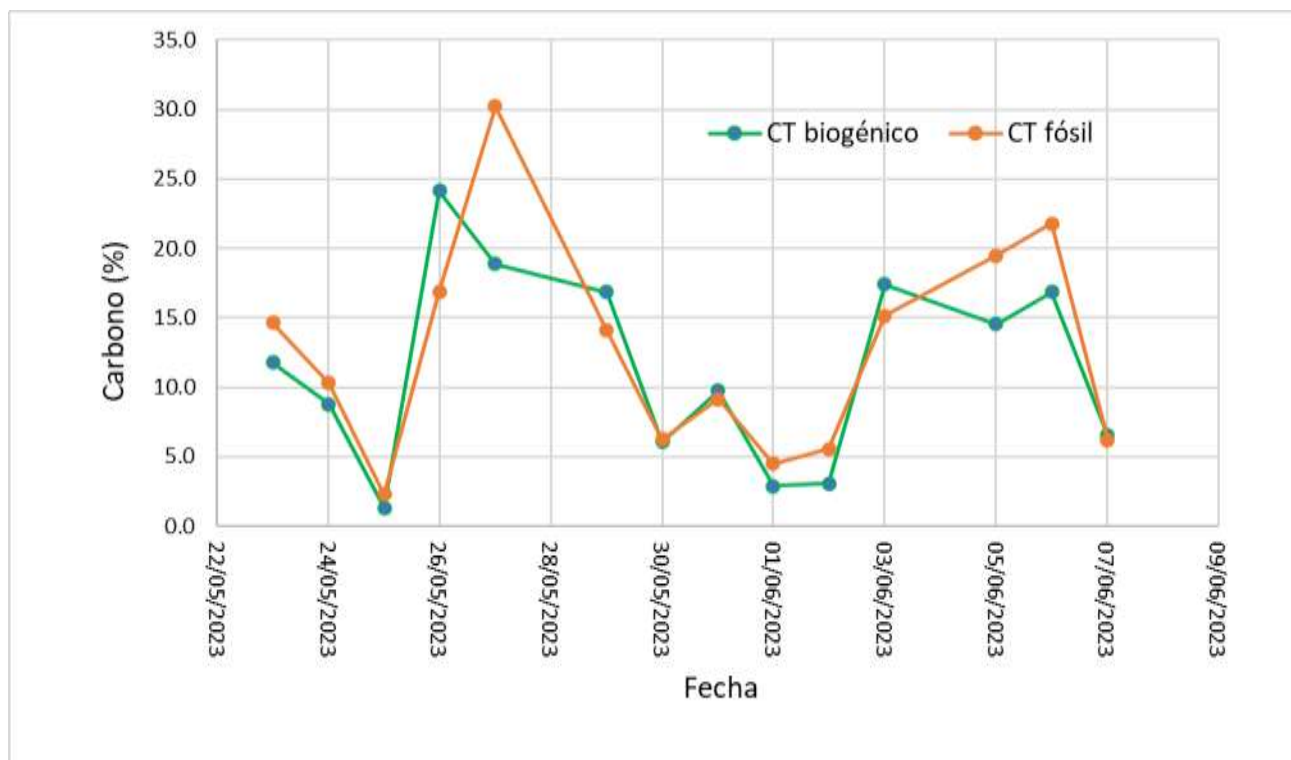


Figura 2 Variación temporal en las concentraciones de CT_{biogénico} y CT_{fósil} en PM_{2.5} colectado en el Puerto de Veracruz.

Tabla 3. Comparación con valores de F¹⁴C medidos en zonas urbanas, en diferentes años.

Sitio	F ¹⁴ C	Estación del año	PM	Referencia
P. marítimo				
Veracruz	0.46	Cálida-seca	PM _{2.5}	Este trabajo
Cuba	0.44	Calida-seca	PM ₁₀	Este trabajo
Zona Urbana				

Cuernavaca, Morelos	0.67	Fría, seca	PM ₁₀	(Solís, et al.,2017) ^[15]
CDMX, centro	0.43	Fría, seca	PM ₁₀	(Stahn & Glavic, 2016) ^[16]
CDMX, CU	0.44	Fría, seca	PM ₁₀	
CDMX, Iztapalapa	0.52	Fría, seca	PM ₁₀	(Solís, et al.,2017) ^[15]
CDMX, CU	0.49	Fría seca	PM _{2.5}	(Solís, et al.,2017) ^[15]
CDMX, CU	0.42	Cálida, seca	PM _{2.5}	(Solís, et al.,2017) ^[15]
T0, México (MILAGRO, 2006)	0.46	Fría, seca	PM _{2.5}	
Milán, Italia	0.55		PM _{2.5}	
Beijín, China	0.34		PM _{2.5}	
Zúrich, Suiza	0.63		PM _{2.5}	
Tokio, Japón	0.6		PM _{2.5}	

5. Conclusiones

En este estudio el análisis con ¹⁴C de aerosoles atmosféricos ha demostrado ser útil para distinguir el aporte de emisiones derivadas de fuentes fósiles y no fósiles (biogénicas).

Los valores promedio de F¹⁴C para TC fueron ligeramente mayores (0.46 y 0.44) en los puertos marítimos de Veracruz y La Habana que en zonas urbanas de alta contaminación por combustibles fósiles como la CDMX (0.43-0.46). Esto refleja que los vientos de la costa no alcanzan a mitigar las emisiones producidas por la actividad portuaria en estas ciudades.

Sería interesante realizar más medidas de $F^{14}C$ en otras zonas costeras para confirmar la gran influencia antropogénica que se observa en los puertos de Veracruz y La Habana, Cuba.

6. Bibliografía

1. SEMARNAT. (2024). Se cuida la salud de las personas y se protege su derecho a respirar aire limpio. <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/con-proaire-se-cuida-la-salud-de-las-personas-y-se-protege-su-derecho-a-respirar-aire-limpio?idiom=es>.
2. Perron, N., Szidat, S., Fahrni, S., Ruff, M., Wacker, L., Prévôt, A. S. H., & Baltensperger, U. (2010). Towards on-line ^{14}C analysis of carbonaceous aerosol fractions. *Radiocarbon*, 52(2), 761–768. <https://doi.org/10.1017/S003382220004577X>
3. Major, I., Furu, E., Varga, T., Horváth, A., Futó, I., Gyökös, B., Somodi, G., Lisztes-Szabó, Z., Jull, A. J. T., Kertész, Z., & Molnár, M. (2021a). Source identification of PM_{2.5} carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary. *Science of the Total Environment*, 782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146520>
4. Szidat, S., Jenk, T. M., Gäggeler, H. W., Synal, H. A., Fisseha, R., Baltensperger, U., Kalberer, M., Samburova, V., Reimann, S., Kasper-Giebl, A., & Hajdas, I. (2004). Radiocarbon (^{14}C)-deduced biogenic and anthropogenic contributions to organic carbon (OC) of urban aerosols from Zürich, Switzerland. *Atmospheric Environment*, 38(24), 4035–4044. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.066>
5. ASIPONA. (2024). Puerto de Manzanillo: Ubicación y Zona de influencia. <https://www.puertomanzanillo.com.mx/esps/0020202/Ubicacion-y-Zona-de-Influencia.html>.
6. Heal, M. R. (2014). The application of carbon-14 analyses to the source apportionment of atmospheric carbonaceous particulate matter: A review. In *Analytical and Bioanalytical Chemistry* (Vol. 406, Issue 1, pp. 81–98). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00216-013-7404-1>
7. Morino, Y., Ohara, T., Xu, J., Hasegawa, S., Zhao, B., Fushimi, A., Tanabe, K., Kondo, M., Uchida, M., Yamaji, K., Yang, L., Song, S., Dong, W., Wu, Y., Wang, S., & Hao, J. (2015). Diurnal variations of fossil and nonfossil carbonaceous aerosols in Beijing. *Atmospheric Environment*, 122, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.055>
8. Grace, J. (2013). Carbon Cycle. In *Encyclopedia of Biodiversity: Second Edition* (pp. 674–684). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00306-3>
9. Li, H., Zhang, M., Wang, L., Ma, Y., Qin, W., & Gong, W. (2021). The effect of aerosol on downward diffuse radiation during winter haze in Wuhan, China. *Atmospheric Environment*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118714>
10. Alam, K., Trautmann, T., & Blaschke, T. (2011). Aerosol optical properties and radiative forcing over mega-city Karachi. *Atmospheric Research*, 101(3), 773–782. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.05.007>
11. Ni, H., Huang, R. J., Yao, P., Cosijn, M. M., Kairys, N., Zhong, H., & Dusek, U. (2022). Organic aerosol formation and aging processes in Beijing constrained by size-resolved measurements of radiocarbon and stable isotopic ^{13}C . *Environment International*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106890>
12. Yang, S. R., Lee, J. H., Yang, J. H., & Park, G. II. (2024). An estimation and radioactivity measurement for radiocarbon(^{14}C) in the Korean nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.02.051>
13. SEMAR-WWF. (2023). Impulsando la descarbonización del sector marítimo-portuario en México, con un enfoque en el puerto de Manzanillo.

14. Takahashi, K., Hirabayashi, M., Tanabe, K., Shibata, Y., Nishikawa, M., & Sakamoto, K. (2007). Radiocarbon content in urban atmospheric aerosols. *Water, Air, and Soil Pollution*, 185(1–4), 305–310. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9454-5>
15. Solís, C., Gómez, V., Ortiz, E., Chávez, E., Miranda, J., Aragón, J., ... & Peralta, O. (2017). AMS ^{14}C and chemical composition of atmospheric aerosols from Mexico City. *Radiocarbon*, 59(2), 321-332.
16. Stahn, J., & Glavic, A. (2016). *and Methods in Physics Research*, A.

Interactividad y experiencias inmersivas en museos científicos: Potenciando la educación infantil.

Lic. Castañeda Martínez Luisa Fernanda (C. M. L.F), ^{afiliación} Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco división CyAD.

al2193051395@azc.uam.mx

cliccom@azc.uam.mx

1. Resumen

El presente trabajo explora cómo la combinación de diseño gráfico, tecnología interactiva y experiencias inmersivas puede transformar la educación científica en los museos para las infancias. Se analizan los fundamentos de la interactividad y la inmersión en el aprendizaje, se describen tecnologías inmersivas aplicadas en museos, y se discuten casos de estudio y desafíos en la implementación de estas tecnologías.

2. Introducción

Los museos desempeñan un papel crucial en la educación infantil, proporcionando un entorno interactivo y estimulante para el aprendizaje. Con la evolución de la tecnología, las experiencias inmersivas se han convertido en una herramienta poderosa para captar la atención de los niños y fomentar una comprensión más profunda de los conceptos científicos.

3. Fundamentos de la interactividad y la inmersión en el aprendizaje

3.1. Fundamentos de la Interactividad y la Inmersión en el Aprendizaje en Museos

En el contexto de los museos, la interactividad y la inmersión se han convertido en herramientas poderosas para transformar la educación infantil. En el **Constructivismo** que es una teoría, propuesta por Jean Piaget, sostiene que el conocimiento se construye activamente a través de la interacción con el entorno. En los museos, los niños pueden interactuar con exposiciones y experimentar conceptos científicos de manera directa. Al participar activamente, construyen su comprensión y conocimiento.

Por su parte, David Kolb enfatiza la importancia de la experiencia directa en el aprendizaje. Según su modelo, el aprendizaje es un ciclo que involucra la experiencia concreta, la reflexión, la conceptualización abstracta y la experimentación activa. Las experiencias inmersivas en los museos, como las tecnologías interactivas, facilitan este proceso al proporcionar situaciones concretas para que los niños exploren y reflexionen. Las teorías educativas como el constructivismo y el aprendizaje experiencial apoyan el uso de experiencias inmersivas y el aprendizaje interactivo. Estas teorías sostienen que los niños aprenden mejor cuando participan activamente en su proceso de aprendizaje y construyen conocimiento a través de la experiencia directa.

3.1.1 Ventajas de la Interactividad y la Inmersión

Al experimentar directamente con conceptos, los niños retienen mejor la información. La interactividad y la inmersión les permiten ver y comprender los resultados de sus acciones, lo que refuerza el aprendizaje. La posibilidad de controlar su experiencia educativa motiva a los niños. Cuando se sienten involucrados y activos, están más dispuestos a aprender. Las experiencias inmersivas hacen que el aprendizaje sea emocionante y relevante. Los niños se comprometen más cuando se sienten parte de la exploración y el descubrimiento.

En conclusión, al combinar teorías sólidas con interactividad y experiencias inmersivas, los museos pueden potenciar la comprensión en los niños y crear una educación significativa.

3.2 Museos que fueron pensados desde la inmersión

La realidad Aumentada (AR) y la realidad Virtual (VR) permiten a los niños interactuar con modelos científicos tridimensionales y explorar entornos virtuales, facilitando la comprensión de conceptos complejos. La Realidad Aumentada (AR) superpone información digital al mundo real, creando una experiencia enriquecida que puede ser interactiva. En los museos, la AR puede utilizarse para mostrar información adicional sobre exposiciones físicas, permitir a los niños ver representaciones virtuales de fenómenos, y ofrecer actividades interactivas que refuercen el aprendizaje. La Realidad Virtual (VR) ofrece una experiencia completamente inmersiva al situar a los usuarios en un entorno virtual. En los museos, la VR puede permitir a los niños explorar lugares inaccesibles, como el interior de una célula, el fondo del océano o el espacio exterior. Estas experiencias pueden hacer que los conceptos sean más tangibles y comprensibles para los niños. Las proyecciones interactivas y los dispositivos táctiles permiten a los niños interactuar con contenido científico en tiempo real, mientras que los sensores pueden crear experiencias personalizadas y adaptativas. Pueden transformar cualquier superficie en una pantalla interactiva. En los museos, estas proyecciones pueden utilizarse para crear exhibiciones que respondan al toque y al movimiento de los niños, haciendo que el aprendizaje sea más dinámico y atractivo.

Los dispositivos táctiles, como las tabletas y las pantallas táctiles, permiten a los niños interactuar directamente con contenido digital. Estos dispositivos pueden utilizarse para presentar juegos educativos, simulaciones y otras actividades interactivas que complementen las exposiciones físicas del museo. Los sensores de movimiento y los sensores de presión pueden utilizarse para crear experiencias de aprendizaje adaptativas. Por ejemplo, los sensores de movimiento pueden detectar cuándo un niño se acerca a una exhibición y activar contenido adicional, mientras que los sensores de presión pueden permitir a los niños interactuar con exposiciones de manera más física. El diseño gráfico es crucial para la creación de interfaces intuitivas y atractivas en aplicaciones interactivas y dispositivos inmersivos. Un buen diseño gráfico puede hacer que la experiencia de aprendizaje sea más accesible y agradable para los niños. Construir narrativas visuales que guíen a los niños a través de experiencias inmersivas facilita la comprensión y la retención de la información científica. Estas narrativas deben ser claras, coherentes y visualmente atractivas.

3.2.1. Casos de estudio y ejemplos prácticos

Se presentan casos de estudio de museos alrededor de la ciudad de México. Estos ejemplos muestran cómo dichas tecnologías han impactado positivamente en la educación infantil, mejorando la participación y el aprendizaje de los niños. Estos museos desde sus inicios fueron pensados para que todo se pudiera tocar y los niños puedan interactuar.

- (a) **Papalote Museo del Niño:** Tras una renovación, este recinto ahora cuenta con mejores instalaciones y más tecnología. Se divide en seis zonas: “El viaje inicia”, “Mi cuerpo”, “México vivo”, “Mi hogar y mi familia”, “Mi ciudad” y el “Laboratorio de ideas”.



- (b) **Universum, Museo de las Ciencias:** Los niños pueden explorar la sala de matemáticas con esculturas de espejos que los multiplican en esferas, cubos y pirámides flotantes en 3D.



- (c) **Museo Interactivo de Economía (MIDE):** En este espacio, los pequeños tendrán su primer acercamiento a las finanzas y conocerán billetes y monedas de otros países. [A través de interactivos digitales, multimedia, gráficos y videos, aprenderán sobre economía y desarrollo sustentable.](#)



- (d) **Museo Herdez:** Este museo ofrece una experiencia ágil e interactiva para observar la evolución de la cultura alimentaria y su influencia en las tradiciones, costumbres e identidad de los mexicanos. [Cada sala está dotada con juegos que brindan información sobre cómo se conservaba la comida en diferentes épocas y la importancia de los ingredientes a lo largo de la historia.](#)



3.3. ¿Y qué pasa cuando no se puede tocar? (Museos que las piezas mostradas no pueden tocarse)

Un ejemplo que ilustra esta cuestión es el Museo Nacional de Antropología. En particular, el departamento de Comunicación Educativa aborda este desafío a través de talleres complementarios, familiares y de verano. También utiliza juegos en línea y animaciones proyectadas en el auditorio para crear experiencias inmersivas. Aunque el museo en sí no se puede tocar, estas actividades permiten crear experiencias que complementan y potencian el aprendizaje. Esta información la obtuve durante mi servicio social en dicho departamento e institución.



Fotos proporcionadas por el departamento de Comunicación Educativa Febrero- Septiembre 2024

3.4. Ejemplo de museo que estudia y divulgan la ciencia para potencializar la educación en infantes a través de la inmersión y piezas que tampoco se pueden tocar: Pabellón de la Biodiversidad en C.U.

El Pabellón Nacional de la Biodiversidad pertenece a la UNAM, situado en el corredor cultural de Ciudad Universitaria. Este proyecto tiene como objetivo expandir y conservar el archivo del Instituto de Biología, así como establecer laboratorios temáticos dedicados al estudio científico de la mayor colección de especies muertas en Latinoamérica. Además, busca potenciar la educación y el interés en la ciencia entre los niños mediante una propuesta museográfica innovadora.

El diseño arquitectónico del pabellón se basa en un esquema radial inspirado en el árbol de la vida, reflejando la conexión entre todos los seres vivos. Las escaleras, ubicadas en el centro del edificio, simbolizan la doble hélice del ADN, que contiene la información genética esencial para la existencia de todas las especies en el planeta. Este enfoque no solo conecta los distintos espacios del pabellón, sino que también sirve como una metáfora visual para los visitantes más jóvenes, facilitando su comprensión de conceptos científicos complejos. La propuesta museográfica está diseñada para ofrecer experiencias interactivas y educativas. Las salas de exhibición y los laboratorios están pensados para involucrar a los niños en actividades prácticas y juegos educativos que fomenten su curiosidad y comprensión de la biodiversidad. La planta radial del edificio facilita un recorrido intuitivo y accesible, permitiendo a los visitantes jóvenes explorar y aprender de manera dinámica.

En términos materiales, la fachada de cristal con aluminio y el basamento de piedra local integran el edificio con su entorno, creando un ambiente acogedor y estimulante que enriquece la experiencia educativa y fomenta una conexión profunda con la ciencia y la naturaleza. El museo tiene considerados espacios para impartir talleres lo cual potencializa la experiencia, si hay piezas que no se pueden tocar pero a los pocos metros de estas hay tecnologías e instalaciones que presentan lo mencionado.



Foto de https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=museo&table_id=2205



Foto de <https://gaceta.facmed.unam.mx/index.php/2022/06/13/conoce-el-pabellon-nacional-de-la-biodiversidad/>



Fotos de <https://gaceta.cch.unam.mx/es/exploran-la-biodiversidad>

4. Resultados y discusión

La implementación de tecnologías avanzadas en el ámbito educativo enfrenta desafíos significativos como los costos elevados, el mantenimiento continuo y la necesidad de actualizaciones constantes. Estos factores pueden representar barreras para la adopción a largo plazo de tecnologías innovadoras en museos y entornos educativos. El elevado costo inicial de tecnologías como realidad aumentada (AR), realidad virtual (VR) e inteligencia artificial (IA) puede limitar la capacidad de muchas instituciones para adoptarlas. Además, el mantenimiento y las actualizaciones requeridas exigen planificación financiera y recursos especializados para asegurar que las tecnologías sigan siendo funcionales y efectivas.

Es fundamental que la tecnología complemente y enriquezca el contenido educativo, en lugar de sustituirlo. La integración de tecnologías avanzadas debe ser planificada para que apoye los objetivos educativos sin desplazar el contenido pedagógico esencial. La tecnología debe servir como

una herramienta que amplifique el aprendizaje, alineándose con los principios pedagógicos del museo o institución.

Para superar estos desafíos, se pueden considerar varias estrategias. Colaborar con expertos en tecnología y educación puede ayudar a superar barreras tecnológicas, ofreciendo asesoramiento sobre la implementación y diseño de experiencias educativas. Buscar financiación y patrocinio, a través de subvenciones gubernamentales, fondos de investigación y colaboraciones con empresas, es crucial para cubrir los costos iniciales y continuos. La inversión en la capacitación del personal educativo es esencial para utilizar eficazmente las tecnologías y resolver problemas técnicos. Implementar sistemas de evaluación y retroalimentación permite ajustar y adaptar las tecnologías para alinearse con los objetivos educativos y las necesidades de los estudiantes.

La irrupción de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático está transformando la educación en museos, especialmente en el contexto infantil. Estas tecnologías enriquecen la experiencia museística y permiten personalizar el aprendizaje. Los sistemas de IA, como asistentes virtuales y chatbots, proporcionan interacción dinámica y adaptativa, mientras que el aprendizaje automático permite analizar patrones de comportamiento para mejorar las exhibiciones y actividades. Las herramientas de AR y VR crean experiencias inmersivas que facilitan la exploración interactiva de conceptos científicos, y las plataformas educativas en línea habilitadas por IA extienden el aprendizaje más allá de las paredes físicas del museo.

Para aprovechar plenamente estas tecnologías, es esencial fomentar la colaboración interdisciplinaria entre tecnólogos, diseñadores educativos y museógrafos. La integración efectiva de IA y aprendizaje automático en los museos puede redefinir la educación infantil, ofreciendo experiencias más personalizadas, accesibles y motivadoras, y fomentando un entusiasmo duradero por la ciencia.

5. Conclusiones

Las tecnologías inmersivas y el diseño gráfico representan avances significativos en la educación científica en museos, ofreciendo nuevas oportunidades para enriquecer la experiencia de aprendizaje. La integración de tecnologías como la realidad aumentada (AR) y la realidad virtual (VR) permite a los visitantes sumergirse en entornos interactivos que facilitan una comprensión más profunda y significativa de conceptos científicos. Estas tecnologías no solo hacen que el aprendizaje sea más accesible, sino que también lo convierten en una experiencia participativa y memorable, transformando la manera en que los jóvenes interactúan con la ciencia.

El diseño gráfico desempeña un papel crucial en la implementación efectiva de estas tecnologías, proporcionando las herramientas visuales necesarias para que los conceptos científicos sean comprensibles y atractivos. La creación de interfaces intuitivas, gráficos informativos y materiales

educativos visualmente estimulantes no solo mejora la estética de las exposiciones, sino que también facilita la asimilación de información compleja. Al diseñar experiencias visuales coherentes y accesibles, los museos pueden captar y mantener el interés de los visitantes jóvenes, estimulando su curiosidad y motivación por aprender.

Para maximizar el impacto de estas innovaciones, es imperativo que educadores, diseñadores y tecnólogos colaboren de manera estrecha y continua. La cooperación interdisciplinaria permite desarrollar soluciones integrales que combinan la experticia en pedagogía con la creatividad en el diseño y el potencial tecnológico. Esta sinergia puede dar lugar a entornos educativos más dinámicos y efectivos, adaptados a las necesidades específicas de los aprendices y a los objetivos educativos del museo.

A medida que avanzamos en la integración de nuevas tecnologías y enfoques de diseño, es fundamental seguir explorando y evaluando estas herramientas para garantizar que proporcionen experiencias educativas enriquecedoras y relevantes. La colaboración entre profesionales de distintas disciplinas no solo facilita la innovación, sino que también asegura que los museos continúen desempeñando un papel vital en la formación científica de las nuevas generaciones. Invitamos a todos los involucrados a continuar con este esfuerzo colectivo, con el objetivo de ofrecer experiencias educativas excepcionales que fomenten el aprendizaje y la pasión por la ciencia en los jóvenes.

6. Bibliografía

1. Anderson, D., & Taylor, C. (2007). Museos y galerías como instituciones educativas. En M. M. Lee (Ed.), *Museos en el siglo XXI: Conceptos, proyectos, edificios* (pp. 95-107). Routledge.
2. Bitgood, S. (2003). Comprender el comportamiento de los visitantes en los museos. En M. McManus (Ed.), *El papel del museo en la educación* (pp. 35-53). Routledge.
3. Cazden, C. B. (1988). *Discurso en el aula: El lenguaje de la enseñanza y el aprendizaje*. Heinemann Educational Books.
4. Falk, J. H., & Dierking, L. D. (2018). *La experiencia del museo revisitada*. Routledge.
5. Ginsburg, H. P. (2009). *La entrevista clínica en la investigación y la práctica psicológica*. Cambridge University Press.
6. Hein, G. E. (1998). *Aprendizaje en el museo*. Routledge.
7. Kolb, D. A. (1984). *Aprendizaje experiencial: La experiencia como fuente de aprendizaje y desarrollo*. Prentice Hall.
8. Kolb, D. A. (2014). *Aprendizaje experiencial: La experiencia como fuente de aprendizaje y desarrollo* (2ª ed.). Pearson Education.

9. Kolb, D. A., & Kolb, A. Y. (2005). *El inventario de estilos de aprendizaje Kolb - versión 3.1: Especificaciones técnicas 2005*. Hay Group.
 10. Piaget, J. (1972). *El lenguaje y el pensamiento en el niño*. Ediciones Morata. (Obra original publicada en 1926).
 11. Piaget, J. (1973). *La construcción de lo real en el niño*. Ediciones Morata. (Obra original publicada en 1937).
 12. McManus, P. (Ed.). (2003). *El papel del museo en la educación*. Routledge.
 13. Bresler, L., O'Connor, K., & Hill, B. (2019). *Learning from the past: How machine learning can enhance educational experiences*. Journal of Educational Technology, 11(2), 33-45.
 14. Brynjolfsson, E., & McElheran, S. (2016). *Data-driven decision making in the digital age: The role of machine learning*. Harvard Business Review, 94(4), 64-72.
 15. Dede, C., Richards, J., & Parsons, C. (2021). *The impact of immersive learning environments on student engagement and achievement*. Educational Technology Research and Development, 69(3), 567-589.
 16. Kirk, D., & Mules, P. (2020). *Virtual and augmented reality in museums: Opportunities and challenges*. Museum Management and Curatorship, 35(1), 56-72.
 17. Santos, A., Oliveira, P., & Silva, R. (2020). *Artificial intelligence applications in museum education: A review*. International Journal of Museum Studies, 14(1), 12-29.
 18. Wang, Y., Zheng, L., & Wang, J. (2021). *Personalizing museum experiences with artificial intelligence: Current trends and future directions*. Museums & Social Issues, 16(2), 115-129.
 19. Zhang, Y., Li, H., & Chen, X. (2022). *Predictive analytics in museum education: Enhancing visitor engagement through machine learning*. Journal of Cultural Heritage, 52, 91-101.
-

Fotografías del MNA proporcionadas por el departamento de Comunicación Educativa del Museo Nacional de Antropología. Contacto: alejandra_razo@inah.gob.mx

Determinación de las constantes cinéticas de la DBO del agua de un humedal sub-superficial de flujo horizontal

Barceló-Quintal I.D.¹, Gómez-Núñez J.², García-Albortante¹, J. Solís-Correa H.E.¹,
Gómez-Salazar S.³, López-Chuken U.J.⁴, Beltrán- Rocha J.C.⁵

1. Departamento de Ciencias Básica de la División de Ciencias Básicas. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco
2. Departamento de Energía de la División de Ciencias Básicas. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

3. Departamento de Ingeniería Química. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Blvd. Marcelino García Barragán No.1421, Guadalajara, Jalisco, México, C.P. 44430
4. Laboratorio de Biotecnología y Laboratorio de Fotocatálisis y Electroquímica Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México
5. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

ibarceloq@gmail.com, jgn@azc.uam.mx, julygaal@yahoo.com.mx,
hsoliscorrea@yahoo.com.mx, sergio.gsalazar@academicos.udg.mx,
ulrico.lopezch@uanl.mx, jucesbeltran@hotmail.com

1. Resumen

Se presenta el resultado de las constantes cinéticas de primer orden del tratamiento de agua residual municipal mediante un humedal sub-superficial de flujo horizontal con canales curvos peraltados para mejorar su hidrodinámica y evitar cortos circuitos hidráulicos, el cual se encuentra en Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, los canales están sembrados con *Phragmites australis* (carrizo) y *Typha latifolia* (tule). Para el estudio hidrodinámico se utilizó el software Mediante el Software Iber. Por su propia estructura se obtuvieron cinéticas en tres secciones de los canales (H0-H2, H3-H5 y H6-H7), con sus respectivas constantes, donde las de la sección H6-H7, fueron las de mayor valor, por influencia de la *T. latifolia*. Se obtuvieron remociones entre 20.52 mg/L y 39.96 mg/L de la DBO₅, y según la NOM-001-SEMARNAT-1996, el valor máximo es de 150 mg/L, por lo tanto se cumplió para uso público urbano. Se obtuvieron buenos rendimientos entre 89.30 % y 91.94.

2. Introducción

Según la Convención de Ramsar sobre Humedales [1], los humedales o wetlands, son “Extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”. Los humedales “artificiales” o “construidos”, son sistemas de tratamiento de aguas residuales poco profundos, en el que se han sembrado plantas acuáticas para tratar un agua residual [2], se diseñan destacando las características y propiedades específicas de los humedales naturales, con el objeto de imitar y mejorar la capacidad de depuración de las aguas residuales. Se clasifican en sistemas de flujo libre o superficial y en sistemas de flujo subterráneo o sub-superficial [3,4]. Estos últimos se subdividen en flujo vertical subterráneo (y flujo horizontal subterráneo [4,5], Figura 1.

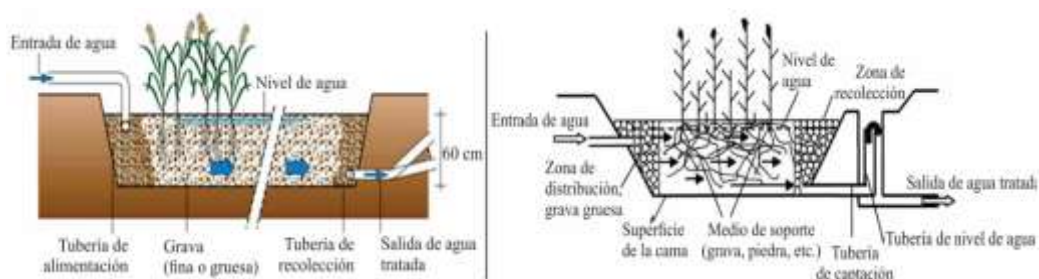


Figura 1: Vista del corte de un humedal sub-superficial de flujo horizontal

Los sistemas de flujo sub-superficial a su vez se clasifican en flujo horizontal y de flujo vertical de acuerdo a la dirección en que circula el agua. En los humedales de flujo horizontal, como es el que se presenta en este trabajo, ubicado en la UAM-Azcapotzalco, el agua circula horizontalmente a través de un sustrato poroso (puede ser grava, o piedra volcánica como el tezontle) de manera continua siempre permaneciendo debajo de la superficie, y al no estar expuesta durante el proceso de tratamiento el riesgo para los humanos y la vida silvestre se reduce al mínimo. La operación de estos humedales, no constituyen un hábitat propicio para los mosquitos [6]. Se favorecen las condiciones anaerobias al mantenerse el nivel del agua por debajo del sustrato. (Figura 1).

3. CONDICIONES EXPERIMENTALES

Descripción del Humedal de flujo horizontal (SSFH)

El humedal sub-superficial de flujo horizontal (SSFH) de la UAM-Azcapotzalco, es alimentado por medio de bombeo con agua residual de una cisterna, que recibe las descargas provenientes de los baños del edificio de la biblioteca de la Universidad y de la planta de tratamiento de El Rosario del Municipio de Tlalnepantla Estado de México cercana a la Universidad, tiene 12.15m de largo y 8 m de ancho con tres canales, ver el diagrama de la figura 2a, cuenta con las conexiones hidráulicas necesarias, además contiene una canaleta con 12 vertederos triangulares (figuras 2b y 2c) para la entrada del agua pretratada al humedal, con un gasto de diseño Q de 9.0 m³/día. un sedimentador previo, un desarenador, ver el diagrama de la 2a. Se diseñó en el año 2009, donde se ensayó el tratamiento de agua residual municipal, encontrándose errores de construcción por lo que se rediseñó, corrigiendo errores hidráulicos en la entrada de cada canal, mediante formas curvas peraltadas con radios de 2.66 m, para evitar cortos circuitos y zonas muertas, considerando un peralte mínimo de 6%, con una pendiente de 1% [7,8], ver las figuras 2d. La velocidad mínima del flujo es de 4.23 m/día.

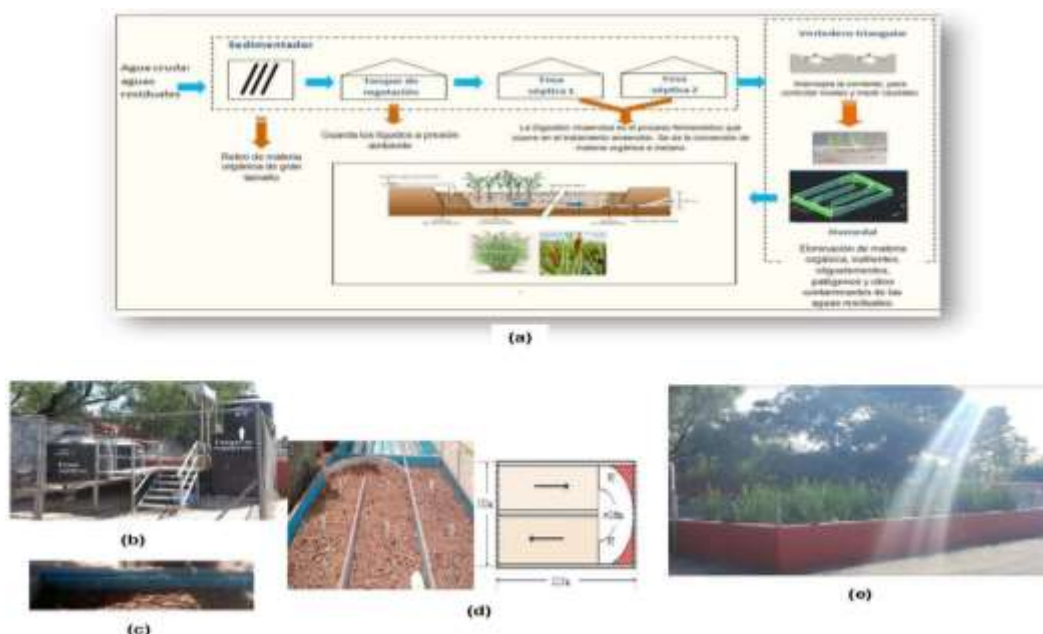


Figura 2. a). Diagrama del sistema humedal sub-superficial de flujo horizontal. b). Sistema de pretratamiento. c). vertedero. d). Curvas peraltadas del humedal. d). Vista del humedal ya construido.

En la figura 2e se indica como está en la actualidad el humedal, con tres camas de sustrato de piedra volcánica (tezontle), con diferente granulometría de 5-10, 10-15 y 15-20 cm, figura 3a, sembrado con *Phragmites australis* (carrizo) en la primera y la mitad de la segunda curva y *Typha latifolia* (tule), en la otra mitad del segundo canal y en el tercer canal figura 3b.

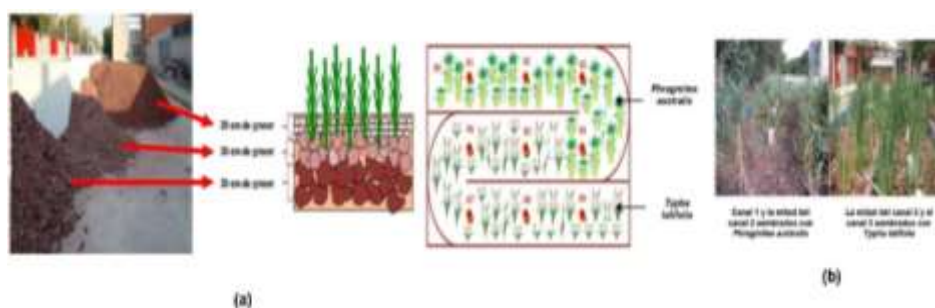


Figura 3.a) Granulometría de las camas soporte de tezontle del humedal y organización de las plantas. b). Plantas sembradas en los canales correspondientes del humedal.

Las medidas *in situ* (medidas de campo) y los muestreos (medidas *ex situ*), se realizaron en nueve sitios de muestreo, figura 4, mediante pozos que, como se muestra en esta figura 4, los cuales constan de tubos de PVC de 21 cm de diámetro con orificios de 4cm que evitan que el sustrato (tezontle) entre, pero permiten el flujo de agua a través del tubo de donde se puede obtener una muestra a cualquier profundidad del humedal.

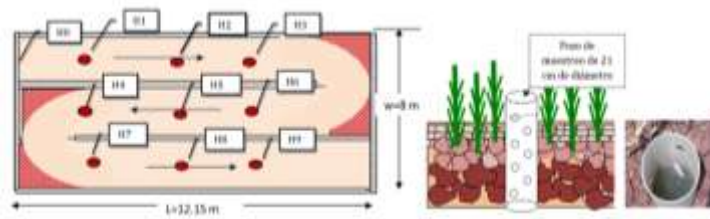


Figura 4: (a). Sitios de muestreos (pozos) (b). Pozo de muestreo.

Para el cálculo de la velocidad en el humedal SSFH, se consideraron la ecuaciones de Darcy, el número de Manning. Mediante las ecuaciones de Darcy, ecuaciones 1, 2 y 3, se realizó el diseño del sistema, considerando el régimen de flujo en el medio poroso y usando como sustrato el tezontle de las tres granulometrías.

$$v = k_s s \quad (1)$$

$$v = \frac{Q}{W y} \quad (2)$$

$$W = \left[\frac{Q A_s}{m k_s} \right]^{0.5} \dots \quad (3)$$

Donde:

v : velocidad de Darcy, la velocidad aparente del flujo a través de la totalidad del área de la sección transversal del lecho, m/d

k_s : conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, m³/m²/d.

s : gradiente hidráulico o "pendiente" de la superficie del agua en el sistema, m/m

Q : caudal promedio a través del humedal, m³/d [($Q_o + Q_e$)/2]

W : ancho de la celda de humedal, m

y : profundidad del agua en el humedal, m

A_s : área superficial de la celda del humedal, m²

m : área superficial de la celda de humedal, m²

Para el cálculo del número de Manning se consideró, la profundidad del agua, la pendiente de la superficie del agua, el gradiente hidráulico, el material del sustrato, así como la densidad de la vegetación (*Phragmites australis* y *Typha latifolia*), ecuación 4

$$v = \frac{1}{n} y^{2/3} s^{1/3} \quad (4)$$

Donde:

v : velocidad de flujo, m/s

n : coeficiente de Manning, s/m^{1/3}

y : profundidad del agua en el humedal, m

s : gradiente hidráulico, o pendiente de la superficie del agua, m/m

Mediante el Software Iber [9], aplicable para lechos porosos poco profundos, se determinó la velocidad en el sistema [10]. Paralelamente, se estudió el crecimiento de las raíces de *P. australis* y *T. latifolia* con la finalidad de conocer las dimensiones de las raíces. Se reprodujeron las condiciones ambientales, y la disposición de los lechos, para observar el crecimiento de las especies, midiendo mes a mes y relacionando el tamaño de las plantas sembrada en columnas de acrílico con el promedio de las especies que se encuentran en el humedal SSFH. Como se indicó en la figura 3b, se indica la disposición de las plantas en el humedal y en la misma el tipo de plantas.

Cinéticas de degradación de la materia orgánica mediante la DBO

Se aplicó la cinética de orden uno, ecuación 5, para el seguimiento de la degradación de la materia orgánica (MO) a través de la DBO₅ [3], para ello se tomó en cuenta el tiempo inicial cero ($t_0 = 0$), la concentración al tiempo cero fue C_0 y la concentración a un determinado tiempo fue C_e .

$$\frac{C_e}{C_0} = e^{(-k_T t)} \dots\dots (5)$$

Donde:

C_0 : Concentración inicial de la MO a través de la DBO₅ (mg/L)

C_e : Concentración en el tiempo t de la MO a través de la DBO₅ (mg/L)

k : Constante de velocidad de reacción (días⁻¹)

t : tiempo (días)

Sitios de muestreo

Se tomaron en cuenta 10 sitios de muestreo, en los meses: uno en enero, dos en febrero, 2 en marzo, y uno en mayo. El primer sitio fue a la entrada del agua H0, el siguiente punto se encuentra pasando los dos tanques sépticos exactamente cuando el agua sale del vertedero de distribución (H0), posterior a este se tienen 3 sitios de muestreo por cada canal dentro del humedal siendo así 9 sitios (H1, H2, ...y H9), estos 9 sitios se indican en la figura 4a.

La temperatura y el pH se monitorearon simultáneamente *in situ* con un equipo Orion Star A325, que se introdujo con el cable en los pozos, procediendo según las normas NMX-AA-007-SCFI-2013 [11] y NMX-AA-008-SCFI-2011 [12], respectivamente. La conductividad y el potencial redox se midieron con un equipo Vernier Labquest acoplado a electrodos para ambos parámetros se utilizó el manual del fabricante así como la norma NMX-AA-093-SCFI-2000 [13] para la conductividad. Para el oxígeno disuelto (OD), se utilizó un equipo (YSI 55, Dissolved Oxygen), y siguiendo la norma NMX-AA-012-SCFI-2001 [14]. La recolección de muestras de agua se realizó con un equipo tipo Bailer. Para la DBO₅ se utilizó un equipo VELD SCIENTIFICA Modelo RESPIROMETRIC Sensor System 6 230 V / 50-60 Hz, para este análisis se consideraron, el manual del equipo y la norma NMX-AA-028-SCFI-2001.[15] Tanto las muestras recolectadas y los análisis de cada una se efectuaron por triplicado.

4. Resultados y Discusión

En la tabla 1 se muestran los valores de la temperatura y del pH en los diferentes sitios de muestreo. La temperatura en promedio se consideró de 20°C a la entrada del humedal, ya dentro de éste la temperatura fue descendiendo, en los meses más fríos a la salida, los valores fueron entre 16.8°C y 17.9°C, subiendo a medida que aumentó la temperatura en los meses siguientes, siendo en el mes de marzo la mayor temperatura de entrada. El pH se mantuvo en un intervalo de 7.4 a 8.4, se observó un atenuación a disminuir debido a la degradación de la MO, donde se efectúan procesos de hidrólisis.

Tabla 1. Variación de los valores de la temperatura y el pH en el humedal

Sitio de muestreo	Temperatura (°C) en 2017						pH en 2017					
	Enero	Febrero. 1	Febrero. 2	Marzo. 1	Marzo. 2	Mayo	Enero	Febrero. 1	Febrero. 2	Marzo. 1	Marzo. 2	Mayo
H0	20.2 ± 0.16	20.0 ± 0.18	21.9 ± 0.23	24.1 ± 0.21	21.1 ± 0.16	21.5 ± 0.20	8.29 ± 0.29	8.37 ± 0.31	8.29 ± 0.03	8.38 ± 0.12	8.33 ± 0.29	8.23 ± 0.20
H1	19.6 ± 0.38	18.3 ± 0.24	18.5 ± 0.23	21.1 ± 0.57	19.9 ± 0.18	20.8 ± 0.28	8.19 ± 0.38	8.18 ± 0.25	8.26 ± 0.18	8.31 ± 0.11	8.27 ± 0.24	8.18 ± 0.19
H2	18.9 ± 0.30	17.0 ± 0.12	17.9 ± 0.38	20.2 ± 0.27	19.0 ± 0.11	19.9 ± 0.12	8.12 ± 0.19	8.09 ± 0.40	8.24 ± 0.32	8.24 ± 0.24	8.24 ± 0.15	8.15 ± 0.26
H3	17.1 ± 0.28	17.0 ± 0.13	17.6 ± 0.27	19.5 ± 0.56	18.6 ± 0.15	19.4 ± 0.24	8.16 ± 0.26	8.13 ± 0.18	8.31 ± 0.24	8.30 ± 0.12	8.28 ± 0.22	8.17 ± 0.16
H4	16.5 ± 0.15	16.2 ± 0.10	17.0 ± 0.25	18.8 ± 0.04	18.5 ± 0.21	18.8 ± 0.19	7.97 ± 0.32	8.06 ± 0.24	8.16 ± 0.24	8.23 ± 0.33	8.18 ± 0.53	8.12 ± 0.28
H5	16.5 ± 0.31	16.1 ± 0.33	17.0 ± 0.53	18.4 ± 0.33	18.4 ± 0.42	18.0 ± 0.38	7.97 ± 0.15	7.92 ± 0.15	8.12 ± 0.11	7.99 ± 0.41	8.14 ± 0.41	7.95 ± 0.25
H6	16.8 ± 0.26	15.7 ± 0.27	17.0 ± 0.04	18.5 ± 0.55	18.8 ± 0.24	17.7 ± 0.31	7.99 ± 0.28	7.97 ± 0.26	8.25 ± 0.24	8.11 ± 0.13	8.09 ± 0.20	8.00 ± 0.29
H7	16.4 ± 0.11	16.8 ± 0.44	17.7 ± 0.11	19.2 ± 0.41	19.0 ± 0.36	18.0 ± 0.33	7.84 ± 0.11	7.70 ± 0.29	7.96 ± 0.25	8.11 ± 0.23	7.93 ± 0.31	7.83 ± 0.22
H8	16.5 ± 0.23	16.9 ± 0.05	17.7 ± 0.28	19.3 ± 0.09	19.4 ± 0.36	18.6 ± 0.13	7.81 ± 0.16	7.65 ± 0.24	7.79 ± 0.01	7.84 ± 0.22	7.87 ± 0.25	7.78 ± 0.28
H9	16.8 ± 0.47	16.9 ± 0.23	17.9 ± 0.39	19.7 ± 0.22	19.3 ± 0.33	19.2 ± 0.10	7.68 ± 0.16	7.61 ± 0.09	7.68 ± 0.27	7.72 ± 0.28	7.74 ± 0.31	7.63 ± 0.09

En la tabla 2, se presentan los valores del ORP y de OD, estos dos parámetros están íntimamente relacionados entre sí con la DBO. El primero se mantuvo con valores negativos durante la temporada del muestreo, lo que permite comprender los bajos valores del OD obtenidos, ya que indican la utilización del OD en la degradación de la MO como de otras sustancias presentes y también la tendencia del comportamiento facultativo del humedal.

Tabla 2. Variación de los valores de la temperatura y el pH en el humedal

Sitio de muestreo	Potencial redox, ORP (mV) en 2017						Oxígeno Disuelto, OD (mg/L) en 2017					
	Enero	Febrero. 1	Febrero. 2	Marzo. 1	Marzo. 2	Mayo	Enero	Febrero. 1	Febrero. 2	Marzo. 1	Marzo. 2	Mayo
H0	-210.0 ± 4.87	-161.5 ± 0.65	-139.8 ± 2.10	-199.8 ± 5.56	-165.8 ± 5.45	-151.9 ± 4.52	1.07 ± 0.011	0.98 ± 0.018	1.02 ± 0.017	0.99 ± 0.014	1.01 ± 0.017	0.98 ± 0.011
H1	-191.1 ± 2.71	-127.1 ± 2.77	-124.5 ± 2.82	-175.4 ± 4.50	-132.9 ± 5.12	-122.1 ± 2.80	0.41 ± 0.003	0.34 ± 0.001	0.27 ± 0.002	0.23 ± 0.001	0.33 ± 0.005	0.31 ± 0.004
H2	-179.9 ± 7.81	-125.7 ± 4.90	-114.9 ± 3.09	-172.8 ± 4.71	-123.1 ± 3.52	-111.4 ± 4.51	0.45 ± 0.008	0.38 ± 0.007	0.30 ± 0.005	0.27 ± 0.004	0.37 ± 0.006	0.38 ± 0.006
H3	-209.5 ± 9.97	-135.4 ± 4.74	-128.6 ± 4.66	-191.2 ± 0.77	-137.4 ± 5.62	-126.0 ± 1.60	0.43 ± 0.005	0.28 ± 0.002	0.26 ± 0.002	0.24 ± 0.003	0.34 ± 0.004	0.33 ± 0.005
H4	-182.9 ± 4.76	-129.9 ± 1.20	-112.4 ± 2.97	-148.5 ± 4.94	-127.1 ± 4.27	-118.9 ± 4.88	0.46 ± 0.006	0.35 ± 0.006	0.35 ± 0.004	0.30 ± 0.004	0.40 ± 0.011	0.37 ± 0.004
H5	-152.8 ± 1.27	-115.1 ± 2.97	-107.8 ± 2.22	-116.7 ± 1.91	-121.0 ± 0.94	-111.0 ± 4.05	0.49 ± 0.009	0.39 ± 0.009	0.37 ± 0.009	0.38 ± 0.003	0.46 ± 0.009	0.44 ± 0.007
H6	-160.7 ± 4.57	-125.6 ± 1.31	-113.8 ± 4.15	-122.2 ± 3.68	-130.9 ± 6.11	-122.8 ± 4.06	0.48 ± 0.008	0.38 ± 0.001	0.36 ± 0.010	0.35 ± 0.005	0.42 ± 0.006	0.39 ± 0.000
H7	-129.6 ± 2.67	-122.4 ± 4.33	-102.8 ± 4.01	-115.9 ± 6.85	-113.4 ± 4.03	-96.27 ± 3.65	0.53 ± 0.008	0.43 ± 0.007	0.41 ± 0.006	0.40 ± 0.003	0.50 ± 0.008	0.45 ± 0.007
H8	-108.3 ± 2.72	-101.9 ± 5.00	-90.67 ± 2.87	-83.63 ± 1.80	-85.44 ± 5.74	-85.13 ± 2.84	0.58 ± 0.011	0.5 ± 0.012	0.47 ± 0.005	0.43 ± 0.004	0.53 ± 0.010	0.54 ± 0.003
H9	-80.66 ± 1.88	-88.61 ± 2.46	-76.07 ± 2.10	-83.93 ± 2.98	-79.65 ± 2.07	-77.97 ± 3.65	0.60 ± 0.007	0.54 ± 0.006	0.52 ± 0.007	0.48 ± 0.009	0.57 ± 0.008	0.56 ± 0.008

Variación de la concentración de DBO₅

En la figura 5 se indica la variación de la DBO₅ en los meses indicados. Donde de enero a marzo del año 2017 fue la temporada de estiaje y en el mes de mayo iniciaron las lluvias, se observó que en este último mes, los valores fueron menores debido a la dilución por la lluvias, ya que fueron de entrada al humedal **225.75 mg/L**. Se observó que

en cada curva (sitios H3 y H6) hubo una tendencia de aumento en los valores de la DBO₅, es decir un aumento de la MO, por efecto de la hidráulica de las curvas.

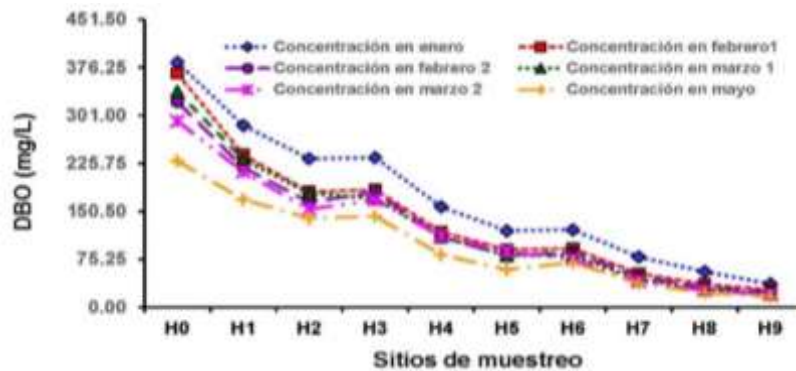


Figura 5. Variación de DBO₅ en los sitios seleccionados en el año 2017

Cinéticas de la degradación de la MO mediante la DBO₅

En el trabajo se presentan los resultados cinéticos de la degradación de la MO a través de la DBO₅ en la temporada de estiaje del año 2017 en los meses indicados en la metodología. En la figuras 6a, 6b y 6c, se indican los perfiles cinéticos de la DBO₅, utilizando la ecuación 5 para cada corrida.

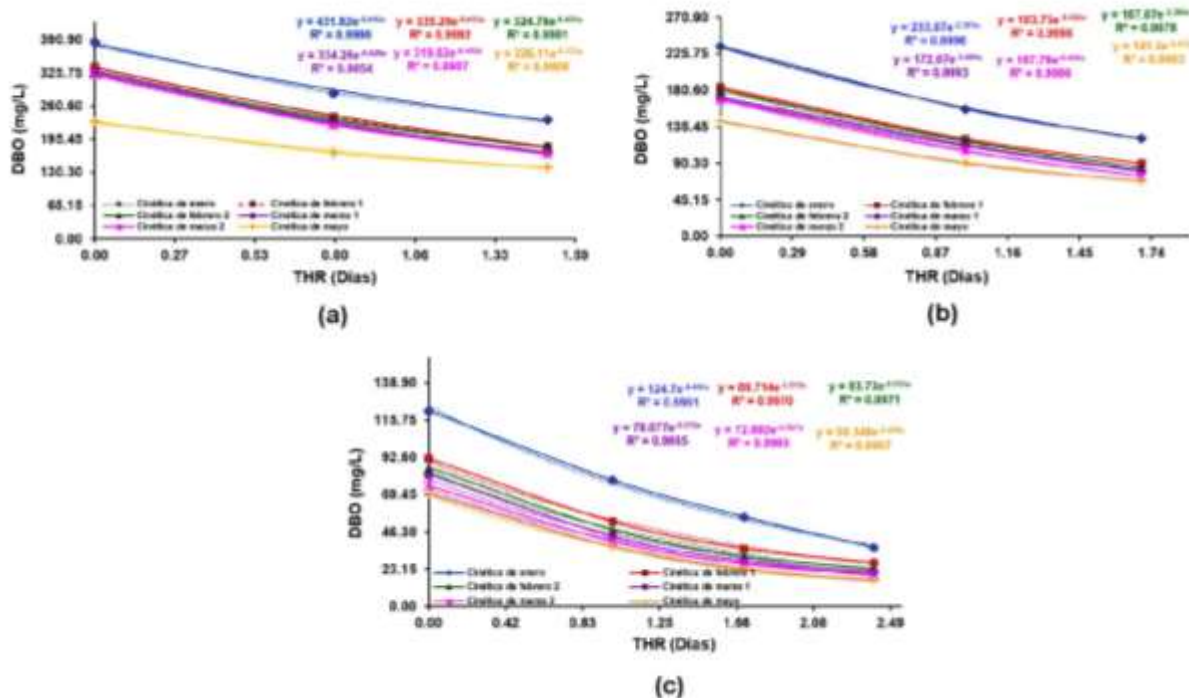


Figura 6. Cinéticas de orden uno de la DBO₅. a). Secciones H0-H2. b). Secciones H3-H5. c). Secciones H6-H9.

Se obtuvieron de cada una la constante cinética k , considerando los tiempos de retención hidráulicos THR. Para ello se dividió por secciones cada cinética considerando las curvaturas, así se tienen la cinéticas de los sitios H0-H2, H3-H5 y H6-H9.

En la tabla 3 se muestran las constantes obtenidas de estas cinéticas con su respectiva temperatura por sección. Se observó el menor valor en el mes de mayo en la sección H0-H2, en la sección H3-H5 los menores valores resultaron en los meses de enero y febrero 2, los valores más altos en general fueron en las sección H6-H9, donde la *Typha latifolia* está sembrada en toda esta sección, que es la que completa el tratamiento.

Tabla 3. Valores de las constantes k (días⁻¹) de las secciones de los canales en los diferentes meses del año 2017

Sección	Valores de la constantes k (días ⁻¹)					
Sitios	Enero	Febrero 1	Febrero 2	Marzo 1	Marzo 2	Mayo
H0-H2	0.416	0.416	0.405	0.428	0.440	0.333
H3-H5	0.391	0.422	0.390	0.445	0.406	0.433
H6-H9	0.504	0.516	0.559	0.576	0.472	0.480

Eficiencia de la remoción de la DBO

En la tabla 4 se presentan los rendimientos finales de la DBO en el periodo de estiaje del año 2017, obteniéndose entre 89.30 y 91.94 %, valores que indican el buen comportamiento del sistema en cuanto a la degradación de la MO biodegradable.

Tabla 5: Rendimiento de la remoción de DBO mediante el tratamiento por el humedal

% de rendimiento de la DBO						
Sitio a Sitio	Enero	Febrero.1	Febrero.2	Marzo.1	Marzo.2	Mayo
H0-H1	29.29	27.84	35.99	29.76	35.55	32.97
H1-H2	24.14	32.23	25.56	22.75	24.45	23.32
H2-H3	0.81	1.69	0.35	3.70	2.23	3.95
H3-H4	45.17	47.47	43.10	46.80	48.68	38.41
H4-H5	32.31	27.52	43.14	35.10	34.10	35.52
H5-H6	7.63	17.11	7.93	19.85	26.67	17.39
H6-H7	28.94	27.69	22.55	21.45	27.54	31.64
H7-H8	27.21	15.23	19.91	24.72	17.93	14.94
H8-H9	22.43	24.66	22.20	18.14	23.59	20.06
H0-H9	91.49	89.76	91.94	89.63	90.31	89.30

5. Conclusiones

El considerar el papel de las biopelículas microbianas en el material poroso y en las raíces de las plantas, así como el efecto de la hidráulica e hidrodinámica del humedal influenciada por las curvas de diseño (ya que se evita la presencia de cortos circuitos, y permite la homogeneización de la velocidad del flujo del agua residual), se pudo calcular los diferentes tiempos de retención hidráulico (TRH), para la obtención de los valores cinéticos de este humedal SSFH. Cabe indicar la importancia de la influencia de la temperatura y del pH, en todos los resultados obtenidos, además de comprender la razón de los bajos valores del OD obtenidos, lo que también indican la tendencia del comportamiento de los procesos dentro del humedal con características más facultativas que anaerobias.

Respecto a los estudios cinéticos de la DBO, se consideraron tres secciones originados por la curvas con peralte al final de cada canal y la siembra de *P. australis* que abarcó canal y medio y la *T. latifolia* que se sembró en el resto del humedal, así cada sección fue: una al inicio, que corresponde al conjunto de sitios H0-H1-H2, otra intermedia con los sitios H3-H4-H5 y una tercera al final, con los sitios H6-H7-H8-H9, comportándose la DBO con una cinética de primer orden.

Se obtuvieron remociones entre 20.52 mg/L y 39.96 mg/L de la DBO₅, y según la NOM-001-SEMARNAT-1996, el valor máximo es de 150 mg/L, por lo tanto se cumplió para uso público urbano, que también la acepta la Ley Federal de Derechos, Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales. Finalmente se lograron a través de este humedal SSFH buenos rendimientos, concluyendo que este sistema funciona con éxito en el tratamiento de la materia orgánica.

6. Bibliografía

1. Convención de Ramsar sobre Humedales. "*Wise use of Wetlands: a conceptual framework for the wise use of wetlands*", 3rd Edition, Vol. 1. Ramsar Convention Secretariat; Suiza. 2007
2. Llagas, W. A.. Diseño de Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM (versión electrónica). Revista del instituto de investigaciones FIGMMG (2006)
3. Crites, R., Gunther, D., Kruzic, A., Pelz, J., & Tchobanoglous, G.. Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. EPA 625/1.88/022. Office of Research and Development. Washington D.C (1988)
4. Reed, S.. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. EPA. 832-R-93-008 (1993)
5. García, J., Rousseau, D. P. L., Morató, J., Lesage, E., Matamoros, V., & Bayona, J. M. Contaminant Removal Processes in Subsurface-Flow Constructed Wetlands: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*; **40** (7), 561-661 (2010).
6. Kadlec, R.H. & Wallace, S.. Treatment wetlands. 2nd Edition. CRC Press; E.U.A (2009)
7. Osornio-Berthet, L.J., Barceló-Quintal, I. D., García-Martínez, M., Solís-Correa, H. E, González-González, J. T. Treatment of Municipal Wastewater by Subsurface Flow Wetlands Modified to Rural Communities in Mexico. *British Journal of Applied Science & Technology*, **19** (2), 1-13 (2017).
8. Barceló-Quintal, I. D.; García Martínez, M.; Osornio-Berthet, L. J. MX Patente 396861 (2022).
9. Iber. Two-dimensional modeling of free sheet flow in shallow waters: Hydraulic reference manual". Ed. Ministry of Environment and Rural and Marine Environment, Water and Environmental Engineering Group, River Dynamics and Hydrological Engineering (Flumen), Center for Studies and Experimentation of Public Works (CEDEX) and International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 59, Spain. (2014). iberaula.es/space/54/downloads.
10. Osornio-Berthet, L.J., Barceló-Quintal, I.D., López-Chuken U.J., García-Martínez, M, Beltrán-Rocha, J.C, Solís-Correa, H.E. Treatment efficient of municipal wastewater

by a subsurface horizontal flow wetland modified to rural communities in Mexico. Proceeding en IWA Specialist Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control-ICW, Gdańsk, Polonia (2016).

11. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013. Análisis de agua-medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.
12. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua-determinación del pH. Método de prueba.
13. Norma mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua. Determinación de la conductividad electrolítica. Método de prueba.
14. Norma Mexicana NMX-AA-012-SCFI-2001. Análisis de agua. Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.
15. Norma mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua. determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (db_{o5}) y residuales tratadas. Método de prueba

COMPONENTES PREDOMINANTES DE UN SEDIMENTO

CONTAMINADO Y SU AFINIDAD ADSORTIVA HACIA Cu

Barceló-Quintal I.D.¹, García-Albortante J.¹, Solís-Correa H.E.¹, Gómez-Salazar S.²

1. Departamento de Ciencias Básica de la División de Ciencias Básicas. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

2. Departamento de Ingeniería Química. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Blvd. Marcelino García Barragán No.1421, Guadalajara, Jalisco, México, C.P. 44430

ibarceloq@gmail.com, julygaal@yahoo.com.mx, hsoliscorrea@yahoo.com.mx,
sergio.gsalazar@academicos.udg.mx

1. Resumen

El estudio de sedimentos juega un papel importante en la movilidad química de los metales y su evaluación por el riesgo potencial como contaminantes, estos están adsorbidos en diferentes componentes del sedimento de un cuerpo acuático, en este trabajo se determinó quien o quienes son los componentes que presentan mayor afinidad hacia Cu, o si éstos tienen ciertos sitios preferenciales hacia alguna de las superficies más predominantes, considerando el modelo de adsorción de Langmuir, para ello se trataron sedimentos de tres sitios de la presa José Antonio Alzate en el Estado de México, en el orden siguiente, sin lavar, lavados con agua caliente, con HCl, con HNO₃ y con H₂O₂. Los primeros presentaron rectas que se fueron distorsionando a medida que avanzaba el tratamiento y se perdían componentes como carbonatos, coloides de Fe,

una gran parte de materia orgánica, para el logro de la interpretación del comportamiento se efectuó una metodología de distribución geoquímica

2. Introducción

El estudio de suelos y sedimentos, juega un papel importante en la movilidad química de los metales ^[1]. Un aspecto importante para evaluar el riesgo potencial de un contaminante metálico en suelos y sedimentos, son los métodos de extracciones secuenciales ^[2]. Las extracciones químicas secuenciales, es una metodología que consiste en determinar la distribución geoquímica de una sustancia adsorbida y/o absorbida en un sedimento o en un suelo, para entender el transporte de los metales traza en ríos, presas, estuarios, lagos, sedimentos y suelo^[3]. En estudios de suelos y sedimentos se ha observado que la movilidad de los diferentes iones está íntimamente relacionada con la capacidad de adsorción, es decir, que los que se adsorben con mayor extensión son menos móviles y que el orden ascendente de movilidad es: $Cu < Pb < Ba < Zn < Cd < Ni < Mg$. Para ello es importante considerar la metodología de extracciones secuenciales y la naturaleza adsorbtiva de los componentes que conforman un sedimento, ya que la **adsorción** es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material acumulándose en una determinada superficie componente ^[4]. El adsorbente dispone de nanoporos, que se conocen como centros activos, estos centros activos permiten que se ubiquen moléculas de naturaleza distinta a la suya. La adsorción es un proceso exotérmico y se produce por tanto de manera espontánea si el adsorbente no se encuentra saturado. Una característica de la adsorción, es el contenido de superficies componentes altamente selectivas ^[5], donde la cantidad adsorbida depende en gran medida de la naturaleza y del tratamiento previo al que se haya sometido la superficie del adsorbente, así como de la naturaleza de la sustancia adsorbida (adsorbato). Al aumentar la superficie del adsorbente y la concentración del adsorbato aumenta la cantidad adsorbida. El modelo de adsorción en los sedimentos, puede complicarse por el hecho de que el adsorbente (sedimento) es químicamente complejo ^[6], en el cual cada adsorbato presenta constantes de afinidad $K_{L,i}$. Un aspecto importante es la carga superficial, donde pueden existir imperfecciones en la superficie o a sustituciones isomorfas en la red cristalina. Esto puede suceder en los silicatos por ejemplo en arcillas. Una isoterma de adsorción es la relación entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente y la concentración de equilibrio a temperatura constante. Las isotermas de adsorción se pueden clasificar ^[7] en: **Isoterma tipo I**, figura 1a, donde se presenta un rápido aumento en la adsorción de la fase libre hasta alcanzar un valor límite o valor de saturación. Este tipo de isotermas se les da el nombre de **isotermas de Langmuir**, se obtienen cuando la adsorción está restringida a una capa de espesor monomolecular. Se manifiestan frecuentemente en la quimisorción o fisorción en sólidos porosos de superficies muy grandes por unidad de peso. Otra es la **Isoterma tipo II**, figura 1b, representa una adsorción física en multicapas sobre sólidos poco porosos. El punto B en la isoterma representa la formación de la capa monomolecular sobre la superficie adsorbente, el resto de la curva representa la formación de multicapas. Las tres últimas isotermas son poco comunes, pero siguen describiendo el comportamiento experimental del fenómeno de adsorción. Las **isotermas de tipo III** (figura 1c) y **V** (figura 1e), demuestran poca afinidad entre el adsorbente y el

sorbato, esencialmente en la primera capa, mientras que la isoterma del **tipo IV** (figura1d) termina de crecer con la concentración de saturación. Sin embargo la superficie cubierta puede adsorber otra capa monomolecular de adsorbatos, las **isotermas del tipo III y V** sólo se obtienen cuando los tipos de adsorción en la primer monocapa son relativamente pequeños.

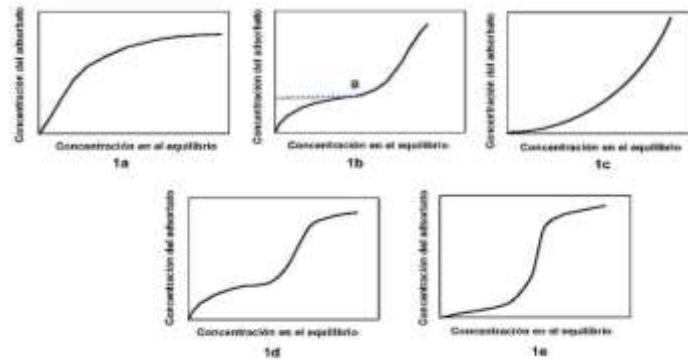


Figura 1. Isotermas de adsorción. a).Tipo I (isoterma de Langmuir). b) tipo II. c). Tipo III. d). Tipo IV. e). Tipo V

El mecanismo de adsorción puede ser múltiple, si se considera que además de la adsorción física, en la cual se basa el modelo de Langmuir, todos los centros activos son igualmente accesibles y su ocupación es aleatoria. Las fuerzas de adsorción son débiles y cada sorbato estará formado por un centro activo y una sola molécula adherida. El modelo de Langmuir debe estar acompañado por la asociación de iones metálicos con la superficie vía el acomplejamiento con las sustancias orgánicas insolubles adheridas en el sedimento, descrita por [8]. El modelo de Langmuir se basa en a_m que es el número de moles de centros activos por unidad de masa del sólido, los centros activos pueden estar libres u ocupados. Se denominará a_0 la concentración de los primeros y a la de los segundos, tal que se tiene la ecuación 1:

$$a_m = a_0 + a \quad (1)$$

La fracción de superficie cubierta se denomina **cobertura**, se representa por Θ , y relaciona la cantidad de sitios activos ocupados con respecto a los centros activos totales, ecuación 2 y al combinar las ecuaciones 1 y 2 se obtiene la ecuación 3:

$$\Theta = \frac{a}{a_m} \quad (2), \quad 1 = \Theta_0 + \Theta \quad (3),$$

donde Θ_0 es la fracción de superficie no cubierta o libre. Se denominará C a la concentración del soluto en fase libre. Considerando el equilibrio y observando que a temperatura constante puede formularse una constante de equilibrio K , ecuaciones 4 y 5.

$$K = \frac{\Theta}{C\Theta_0} = \frac{\Theta}{C(1-\Theta)} \quad (4) \quad \text{o bien} \quad \Theta = \frac{KC}{1+KC} \quad (5)$$

La ecuación 5 puede ser expresada de varias maneras en forma lineal con respecto a a_m , sustituyendo la ecuación 2 en 5 y reorganizando, resultan las ecuaciones 6, 7 y 8, respectivamente:

$$\frac{a}{C} = Ka_m - Ka \quad \frac{C}{a} = \frac{1}{Ka_m} + \frac{1}{a_m} \quad \frac{1}{a} = \frac{1}{a_m} + \frac{1}{Ka_m C} \quad (6, 7, 8)$$

Una forma de exhibir esta mayor complejidad es trazar las isothermas de Langmuir ($1/a$ vs. $1/C$), cuyas graficas deben de dar líneas rectas. Los cambios de pendiente en estas rectas pueden mostrar las etapas o procesos diferenciados de adsorción.

Para poder diferenciar los diferentes componentes de un sedimento, investigadores como [9,10,11], emplearon métodos para estimar la reactividad metálica con los diferentes tipos de componentes de un sedimento enriquecido de metales adsorbidos. En la figura 2 se presenta una relación de componentes importante en un sedimento y cómo se van depositando en la matriz por lo general de aluminio-silicatos.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, en este trabajo se determinó quien o quienes son los componentes que presentan mayor afinidad hacia Cu, o si este tiene ciertos sitios preferenciales hacia alguna de las superficies predominantes, pues como se ha indicado, un sedimento presenta multicomponentes como: una variedad de arcillas con diferentes áreas superficiales de adsorción, materia orgánica (MO), coloides de Fe, Mn y Al, carbonatos, entre otros

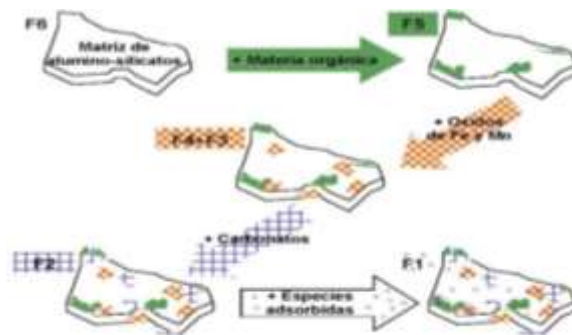


Figura 2. Metodología de distribución geoquímica en un sedimento (Barceló 2000)[1]

3. Condiciones experimentales

Con el objeto de estudiar el comportamiento de los componentes de un sedimento como superficies adsorbtivas y su afinidad con el cobre, se procedió al revés de la metodología experimental de la distribución geoquímica. Los sedimentos se obtuvieron de diferentes sitios de la presa José Antonio en el Estado de México, figura 3, se dividieron en zonas, siguiendo la metodología como se menciona en los estudios de [1]. Se seleccionaron las zonas "A" (entrada del río Lerma a la presa, por lo tanto de los acarreos aluviónicos y de material agro-industrial), "B" (zona de área, donde pierde fuerza el río) y "F" (zona de la cortina de la presa y salida del río).

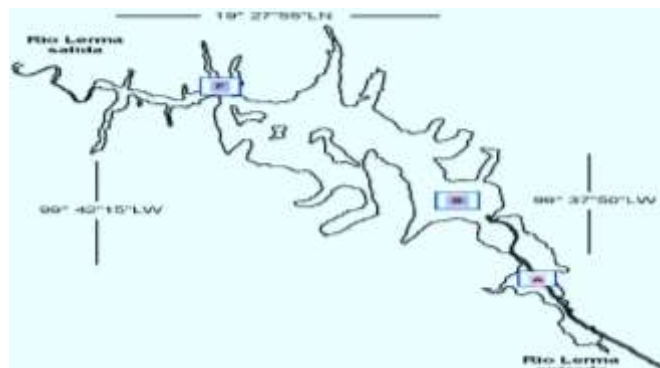


Figura 3. Sitios de muestreo en la presa José Antonio Alzate en el Estado de México

El núcleo de sedimento obtenido fue de 20 cm de grosor, empleando un nucleador tipo Gravity. Se colectaron los sedimentos, se secaron a 60 °C y posteriormente, se tamizaron en tamices marca Mont-Inox, tipo Tyler y se seleccionó el sedimento retenido en malla 250 μm . Mediante la técnica de cuarteo se mezclaron los sedimentos de las tres zonas en partes iguales, para poder obtener un sedimento que comprenda todos los componentes del sedimento global de la presa, logrando 4 kilos de sedimento. Se tomaron 4 muestras de 500 gr de sedimento, la cual una se utilizó para el análisis por distribución geoquímica y otras tres para establecer tres cinéticas como réplicas. Posteriormente se tomó una muestra para el estudio de distribución geoquímica siguiendo la metodología indicada en [1], según el esquema del cuadro de la figura 4:

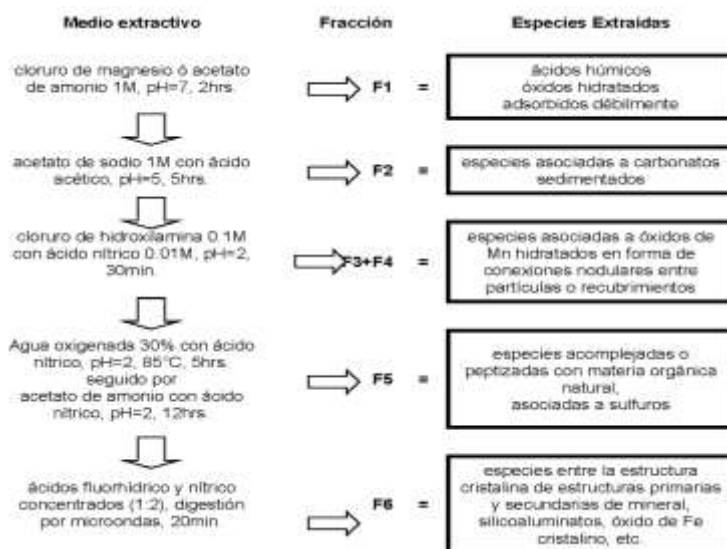


Figura 4. Esquema analítico de la metodología de distribución geoquímica

Para los estudios de adsorción se corrieron 3 cinéticas de porciones de 5 gramos que se denominarán réplicas, del sedimento sin lavar. Posteriormente a 250 g del sedimento lavado se le trató con un litro de agua caliente, se agitó durante 30 min con intervalos de 10 min y lapsos de reposo de 5 min. La mezcla de sedimento con agua caliente se filtró, secó y se procedió a las corridas cinéticas. De este sedimento lavado y secado, se

tomaron 150 g y se siguió la técnica anterior, pero ahora lavándose con una solución de HCl 5N (aproximadamente un litro). Se agitó durante 30 min con intervalos de 10 min y reposándose por dos días, se agregaron en dos etapas dos litros más de la solución de HCl 5N y se procedió a correr las cinéticas. Se cuidó de neutralizar el pH, lavándose el sedimento, secándose a 60°C, para seguir con un lavado con solución de HNO₃ 1N, en tres etapas, con porciones de un litro. Se agitó por 30 min en cada etapa de lavado, con intervalos de 10 min, reposándose por 60 horas. Después se filtró y el exceso de ácido se eliminó con lavados de agua fría, hasta pH neutro. El sedimento se secó a 60 °C y se procedió de nuevo a las corridas cinéticas. Finalmente como última etapa, se procedió al lavado del sedimento con peróxido de hidrógeno (H₂O₂ al 30%), con el objeto de oxidar el resto de la materia orgánica residual, para ello, se fueron agregando lentamente diez porciones de 20 ml debido a la fuerte reacción producida. El material fue agitado suavemente durante 24 horas. Después se le mantuvo durante 90 minutos en un baño a 70 °C. Una vez que la reacción dejó de ser violenta, se le agregaron 100 ml más de H₂O₂, para tener la certeza de que la reacción sea completa. Se agitó suavemente durante 2 horas. Finalmente, se le agregaron 550 ml de agua caliente para quitar el exceso de peróxido. Y por último se realizaron tres lavado con agua fría de un litro cada uno, los sedimentos se filtraron, se secaron y se procedió a las cinéticas. Para cada una de las cinéticas se utilizó una concentración de 100 ppm (mg/L) de cobre.

4. Resultados y discusión

Distribución Geoquímica del Cu en el sedimento

En la figura 5, se presenta la distribución geoquímica del cobre en las tres zonas de la presa Alzate. Se observa que este metal se acumuló mayormente en la fracción F5 correspondiente a la MO y a los sulfuros, seguido de la F6 donde puede estar más dentro de las redes cristalina que adsorbido, también hay relación con la fracción F4, que presentan coloides hidratados principalmente de Fe como goethita (óxido de hierro hidratado) y hematita, el cual tiene áreas adsorptivas grandes ^[12]. La mayor concentración del Cu se encontró en la zona A, que es la entrada del río Lerma a la presa ^[1]. En la zona B se encontró el valor más alto en la fracción F2, donde están presentes los carbonatos. Las fracciones F1, F2 y F3, son las fracciones más móviles y son las fracciones consideradas peligrosas, ya que pueden fácilmente pasar a la fase acuosa. Las fracciones F4 y F5 pueden considerarse casi fijas, y la F6 totalmente fija y de poco riesgo

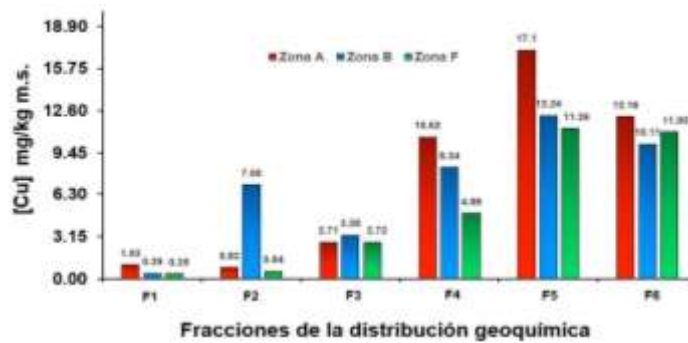


Figura 5. Distribución geoquímica de Cu en tres zonas de la presa J.Alzate

Adsorción del Cu en sedimentos tratados y obtención de las isothermas de Langmuir

En la adsorción del cobre con sedimento sin lavar, la forma de las tres curvas tendió a la forma I (figura 6a). donde se muestra un rápido aumento en la adsorción de la fase libre hasta alcanzar a partir del punto nueve un valor de saturación.

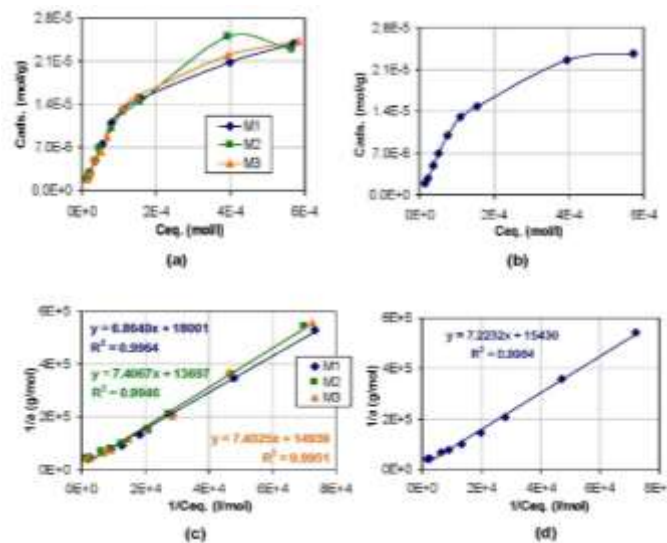


Figura 6. a). Perfil de Isothermas del sedimento sin lavar. b). Isothermas de Langmuir

Esto sugiere la presencia de una capa de grosor monomolecular, donde probablemente existan adsorbentes con superficies muy grandes. En la figura 6b, se presenta el promedio de las tres corridas y en las figura 6c y 6d, se indican las adsorciones de Langmuir de las tres corridas y su promedio respectivamente. El modelo de Langmuir dio una buena correlación de los puntos, donde puede estar predominando algún adsorbente como la materia orgánica y/o los sulfuros ^[13,1], como indica la distribución geoquímica, figura 5, que tienen alta afinidad por el Cu.

En el caso del sedimento lavado con agua caliente, gráficas de la figura 7a, entre los puntos 5, 6 y 7, se observó una ligera distorsión respecto a las curvas del sedimento sin

lavar, sin embargo la tendencia tipo I de la curva de adsorción se mantuvo, observándose más claramente en la figura 7b del promedio. En la isoterma tipo Langmuir (figuras 7c y 7d), se pierde algo de linealidad. El agua caliente pudo eliminar algo de los materiales adsorbentes importantes.

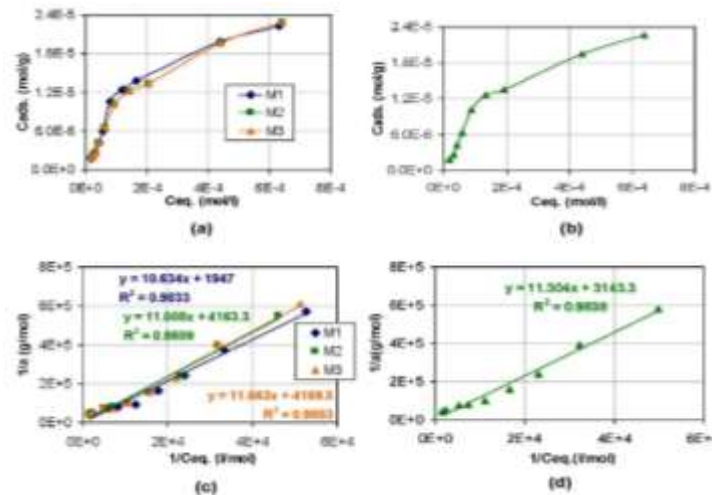


Figura 7. a). Perfil de Isothermas del sedimento lavado con H₂O caliente. b). Isothermas de Langmuir

Para el caso del sedimento tratado con HCl, se observó que las isothermas se asemejan a la del tipo IV, ver figura 1d, donde la isoterma deja de crecer cerca de la concentración de saturación (punto 5), ver las gráficas de la figura 8a y el promedio figura 8b. Esta superficie cubierta puede adsorber otra capa monomolecular, lo que se refleja a partir del punto 6. Esto puede significar que el HCl ha degradado una buena parte de alguno de los adsorbentes predominantes, entre ellos, pudiera ser sulfuro, por el olor a éste en el momento de tratar el sedimento, cambiando también la porosidad y los sitios activos.

Para las isothermas de las figuras 8c y 8d (curva promedio), se observa claramente una linealidad con los últimos cinco puntos. Existe también, observando la gráfica que los

puntos 4, 3 y 2 (recordando que en el modelo de Langmuir se invierte el orden) están a su vez alineados, como si existieran diferentes adsorbentes. Eliminandose el predominio del adsorbente que existía en el sedimento sin lavar y lavado con agua caliente

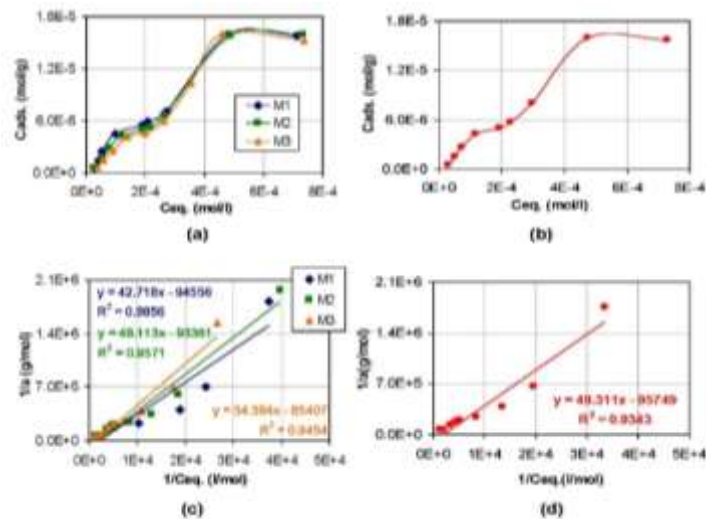


Figura 8. a). Perfil de Isothermas del sedimento lavado con HCl. b). Isothermas de Langmuir

En el sedimento tratado con HNO_3 , se siguió presentando la isoterma tipo IV con los puntos superiores aún en proceso de saturación, lo que puede significar más pérdida de algún componente de mayor afinidad hacia el cobre dejando al descubierto algún otro componente de rápida adsorción y saturación, se observó este comportamiento en todas las curvas de la figura 9a y su mejor definición en la curva promedio, figura 9b.

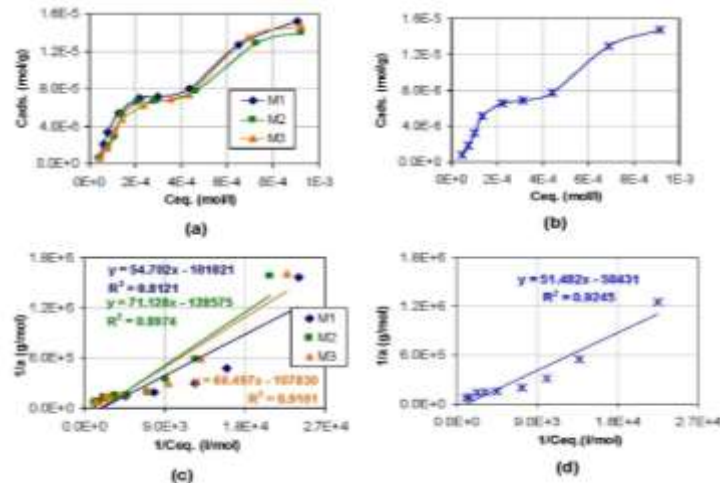


Figura 9. a). Perfil de Isothermas del sedimento lavado con HNO_3 . b). Isothermas de Langmuir

Como el análisis e interpretación de los casos anteriores, la característica de las curvas de Langmuir, es que los puntos que corresponden a la mayor concentración (los que están cerca del origen de las gráficas de las figuras 9c y 9d, están tan cercanos entre sí, que es difícil ver la presencia del otro segmento lineal.

Para el caso del sedimento tratado con H_2O_2 , se sigue conservando la isoterma IV (figuras 10a y 10b), pero con escalones menos definidos, sin embargo en este caso se ha eliminado prácticamente a los sulfuros (su olor se notó desde el tratamiento con HCl), así como gran parte del material orgánico, se observó que el material presentaba características cristalinas, es importante indicar que en los estudios de ^[1], se clasificó estos sedimento, resultando arena con un promedio de 18.32%, limo 17.66 % y arcilla 68.58 %, el color rojizo que se presentó, se debe al contenido de compuestos de hierro, en forma de minerales de hematita y goethita.

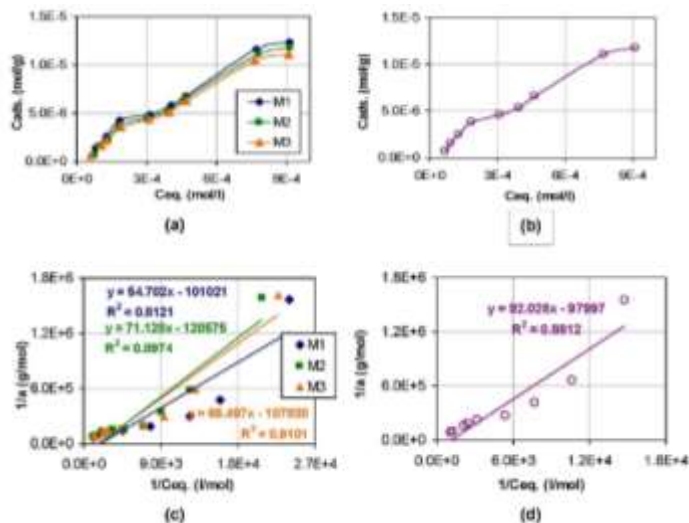


Figura 10. a). Perfil de Isotermas del sedimento lavado con H_2O_2 . b). Isotermas de Langmuir

Considerando las cinéticas de Langmuir, figuras 10c y 10d, si se descuenta el punto 1, que no parece participar en las tendencias lineales, los puntos 2, 3 y 4 podrían dar una línea recta y los restantes, otra, consistentes con los dos escalones que se observan en las isotermas de adsorción, esto se ve mejor en la gráfica promedio (figura 10d). Parece que es la MO la que predomina como adsorbente, dando curvas de adsorción tipo I y otro paquete con curvas tipo IV, pero con disminución en la capacidad adsorptiva, donde da la idea de que el Cu es cada vez menos afín. Esto se relaciona con la especiación del Cu en los sedimentos, donde éste, como ya se había dicho antes, se encuentra acumulado principalmente en la fracción F5 (en esta etapa persistió un color rojizo que puede ser óxido de hierro como hematita).

5. Conclusiones

En conclusión en el caso del sedimento sin lavar pueden existir agregados grandes que pueden seguir existiendo después del lavado con agua caliente, pero desaparecen en los tratamientos ácidos y con los oxidantes, además se observó que la textura tiende a la cristalinidad. Por otro lado, las partículas de mayor tamaño se pudieron haber limpiado desde el lavado con agua, perdiendo el material amorfo que lo recubre, sin embargo en el material lavado con el H_2O_2 , el material que contiene óxido de hierro quedó junto con el material cuarzoso (arenas de diferente tamaño), siendo estos más porosos, lo que ocasiona que se deforme la isoterma tipo IV. Se puede suponer que el material original contenía hierro en dos formas distintas, una hidroxilada (goethita) que es soluble en HCl y cuya disolución le dio color rojizo al líquido filtrado del lavado con el ácido y otro óxido que es insoluble (hematita). Los dos materiales férricos son superficies adsorbentes, y la pérdida de la goethita puede ser responsable de que estas curvas de adsorción tipo IV, sean más suaves que las anteriores.

6. Bibliografía

1. Barceló Q.I. Estudio de la Movilidad de Ca, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, y Zn en sedimentos de la presa José Antonio Alzate en el Estado de México. Tesis doctoral. (2000).
2. López-Galván E. , Barceló-Quintal I., Solís-Correa H.E., Bussy A.L., Avila-Pérez P., Martínez D.S. Calculation of the ecological risk index in the José Antonio Alzate Dam, State of Mexico, Mexico. *Biol Trace Elem Res.* **135** (1-3),121-35, 2010.
Doi: 10.1007/s12011-009-8501-z.
3. Barceló Q.I.D., Solís C.H.E., Ávila P., López G.E., Gómez S.S., García A. Determination of distributions of Cd, Cu, and Pb concentrations in sediments of a Mexican reservoir to infer their environmental risk. *Biological Trace Element Research*, **148**, 122-132, 2012.
4. Sánchez M. F. y Moreira M. C. Análisis de la cinética de adsorción de cobre (II) con diferentes materiales: Una revisión bibliográfica. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios.* **9** (1), 1-12, 2022
ISSN-e: 2313-, revista.colon.ciencias@gmail.com
<http://portal.amelica.org/ameli/journal/215/2152932008/>
5. Van Riemsdijk. W. H., De W. J. C., Koopal L. K., Bolt, G. H. Metal ion adsorption on heterogeneous surfaces: Adsorption models. *Journal of Colloids and Interface Science.* **116**: 511–522, 1987.
6. Tejada-Tovar C, Villabona-Ortiz A.y Garcés-Jaraba L. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico, *Tecno Lógicas*, **18** (34), 109-123, 2015.
7. Maron S.H y Prutton C F. Fundamentos de Fisicoquímica. Capítulo 20, pp 822-829. Editorila Limusa, (1996).
8. Tipping E. Modelling the competition between alkaline earth cations and trace metals species for binding by humic substances. *Environ. Sci. & Technol.*, **27**, 520-529, 1993.
9. Tessier A., Campbell P.G.C. y Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, **51**, 844-851, 1979.
10. Salomons W., Förstner U. Trace metals analysis on polluted sediments. Part 2. *Environ. Technol. Lett.*, **1**, 506-517, 1980.
11. Calmano W., Förstner U. Chemical extraction of heavy metals in polluted river sediment in Central Europe. *Sci. Tot. Environ.*, **28**, 77-90, 1983.
12. Dzombak D.A., Morel F.M.M. **Surface Complexation Modelling. Hydrous Ferric Oxide. Wiley Interscience Publ.** **13**. (1990).
13. Davis J.A. Complexation of trace metals by adsorbed natural organic matter. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **48**, 679-691, 1984.

Riesgos a la salud a trabajadores de sitios de disposición final

Cárdenas-Moreno P.R.¹, Robles-Martínez, F.² Piña-Guzmán, A.B.², Moreno-Torres L.R.¹, Ramírez-Rojas A.¹

¹Área de Física de Procesos Irreversibles, Departamento de Ciencias Básicas,
Universidad Autónoma Metropolitana.

²Departamento de Bioprocesos, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología,
Instituto Politécnico Nacional.

prcm@azc.uam.mx, froblesm@ipn.mx; apinag@ipn.mx; lrmt@azc.uam.mx;
arr@azc.uam.mx

1. Resumen

Durante la gestión de residuos sólidos urbanos, los trabajadores enfrentan riesgos para su salud, especialmente en los sitios de disposición final, debido a la liberación de compuestos nocivos durante la compactación y degradación de la fracción orgánica de los mismos. Este estudio tiene como objetivo señalar las posibles afecciones de salud, derivadas de la exposición a gases y contaminantes tóxicos presentes en los residuos. Se observó que los trabajadores en sitios no controlados tienen un mayor riesgo debido a la falta de infraestructura adecuada y de equipo de protección personal. La exposición a estos elementos se asocia estrechamente con efectos adversos en la salud, cuya gravedad depende del nivel de exposición. El estudio subraya la importancia de realizar una evaluación integral de riesgos para identificar y cuantificar las sustancias y microorganismos presentes en el ambiente, con el fin de reducir los riesgos laborales y cumplir con la normativa mexicana para personal ocupacionalmente expuesto.

2. Introducción

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) en México enfrenta graves desafíos en todas sus etapas, desde la recolección y separación, hasta la disposición final. En muchos casos, los RSU deben ser transportados a largas distancias, a veces fuera de la entidad generadora, como ocurre en la Ciudad de México. La falta de una adecuada gestión de residuos ha dado lugar a la proliferación de tiraderos a cielo abierto, donde no existe control sobre los residuos ingresados ni protección ambiental, y se practican actividades peligrosas como la quema de residuos para reducir volumen y recuperar materiales de valor, además de la pepena informal, ambas prácticas comunes en el país.

La pepena, una actividad prevalente en países en desarrollo, se estima que involucra hasta el 2% de la población^[1]. En México, los trabajadores en los sitios de disposición final (SDF) se dividen en dos grupos: formales e informales. El sector formal, conformado por empresas privadas y regulado por el gobierno, opera en sitios que cumplen con las normativas y cuenta con personal especializado.

En contraste, el sector informal trabaja principalmente en tiraderos a cielo abierto, donde se dedican a la recolección y venta de residuos, a menudo sin control municipal. A pesar de su informalidad, los pepenadores desempeñan un papel crucial en la gestión de residuos, alargando la vida útil de los SDF a través de la recuperación de materiales valorizables.

A lo largo de décadas, la pepena ha sido una parte integral de la gestión de residuos en México, aunque no está formalmente reconocida por la legislación. Estudios previos, en la Ciudad de México^[2], en Guadalajara^[3] y en Mexicali^[4], han documentado la importancia de los pepenadores en el manejo de residuos.

En los países en vías de desarrollo, predomina la disposición final de los residuos sólidos en el suelo. Es muy común que ésta se realice inadecuadamente y que los SDF no cumplan con los requisitos mínimos que aseguren la mitigación del impacto ambiental y la afectación de la salud pública. Entre los problemas más generalizados de la disposición final de los RSU, están la mezcla de residuos de diferentes fuentes y características, el recubrimiento deficiente, la pepena, la quema, así como, la carencia de infraestructura para el control de los lixiviados y biogás^[6].

El panorama es aún más complejo porque la mayoría de los SDF en México operan como tiraderos a cielo abierto, lo que genera riesgos significativos para la salud y el medio ambiente. Estos sitios no solo contienen residuos orgánicos, sino también plásticos, electrónicos, y otros materiales que pueden liberar contaminantes orgánicos persistentes, compuestos aromáticos, orgánicos volátiles y microorganismos patógenos. Estas sustancias pueden causar serios problemas respiratorios y gastrointestinales tanto en exposiciones agudas como crónicas.

La salud ocupacional es un aspecto clave en este contexto, ya que los trabajadores de SDF son los primeros en estar expuestos a estos contaminantes. Diversos estudios han documentado los riesgos para la salud de estos trabajadores, incluyendo enfermedades pulmonares, problemas musculoesqueléticos, y síntomas relacionados con la exposición a polvos orgánicos y patógenos. Además, se han reportado afecciones como diarrea, micosis, ulceraciones, alteraciones neurológicas, y trastornos del estado de ánimo, entre otros.

Este estudio se enfoca en identificar las posibles afecciones en los trabajadores de SDF causadas por la exposición a los contaminantes emitidos durante la disposición final de los RSU, siendo este grupo poblacional el más vulnerable debido a su constante contacto con estos peligros.

3. Condiciones experimentales

Los riesgos ocupacionales implican exposiciones específicas en determinadas profesiones. En los trabajadores de sitios de disposición final (T-SDF), estos riesgos incluyen la exposición a cargas de trabajo pesadas, bioaerosoles, compuestos volátiles, materiales potencialmente peligrosos o incluso infecciosos. Estos trabajadores también enfrentan problemas musculoesqueléticos, dérmicos, respiratorios y gastrointestinales. Las vías de exposición que permiten la entrada de agentes dañinos en el cuerpo humano incluyen la vía inhalatoria (respiración), dérmica (contacto con la piel) y oral (ingestión de alimentos o líquidos) ^[6, 7].

Para el presente trabajo, definimos riesgo biológico como la posible exposición a microorganismos que puedan dar lugar a enfermedades, originada por la actividad laboral. Los agentes biológicos que encuentran en los SDF se pueden introducir al cuerpo por medio del consumo de alimentos contaminados con microorganismos patógenos. Los agentes responsables de las enfermedades transmitidas por los alimentos se pueden dividir en cuatro categorías generales: químicas (por ejemplo, envenenamiento por hongos o escombroides), parasitarias (por ejemplo, *Trichinella* o *Giardia*), virales (por ejemplo, Hepatitis A o Norovirus) y bacterianas (por ejemplo, *Salmonella* o *Campylobacter*).

En los residuos orgánicos, las principales poblaciones microbianas son las bacterias y los hongos. En el caso de los hongos, las esporas de *Aspergillus* y *Penicillium* predominan debido a la descomposición de la materia orgánica almacenada que sirve de alimento para ellas. Esto difiere de las poblaciones habituales de hongos polimorfos presentes en el aire exterior, donde los hongos mesofílicos, tales como *Cladosporium*, *Alternaria* y *Didymella*, que se desarrollan frecuentemente sobre hierba y otras plantas vivas. Además, *Aspergillus fumigatus* crece fácilmente en materiales de construcción húmedos (tableros de yeso, madera, aglomerado, cartón y lana mineral) que pueden ser descargados en vertederos de residuos no peligrosos como residuos comerciales e industriales^[8].

Un riesgo adicional causado por agentes biológicos son los compuestos orgánicos volátiles de origen microbiano (MVOC). Estos subproductos se forman durante el metabolismo primario y secundario, principalmente en la oxidación de glucosa (Korpi et al., 2009). Aunque más de 200 MVOC han sido identificados en estudios relacionados con residuos, ninguno es exclusivo de origen microbiano ni específico para ciertas especies^[9-15]. Sin embargo, varios MVOC se han asociado con especies de *Aspergillus*, como 3-metil-1-butanol, 2-metil-1-propanol, terpineol, entre otros^[13]. Estos compuestos representan un riesgo químico, aunque de origen biológico.

Definimos riesgos químicos como aquellas sustancias o mezclas capaces de alterar las condiciones ambientales del centro de trabajo y, por sus propiedades, concentración, nivel y tiempo de exposición, pueden afectar la salud de los trabajadores. En los SDF, estos riesgos incluyen productos químicos de uso común en hogares e industrias, como pinturas, barnices, aerosoles y disolventes orgánicos, que pueden tener efectos graves sobre la salud humana. La exposición prolongada a algunos disolventes puede causar cáncer, daños en el sistema nervioso, riñones, hígado, corazón, pulmones, así como en la piel, el sistema reproductor y el sistema endocrino ^[16]. Algunas de estas enfermedades han sido asociadas con la exposición laboral a estos compuestos ^[17].

Por otro lado, los riesgos físicos se refieren a agentes capaces de alterar las condiciones ambientales del trabajo, como vibraciones, temperaturas extremas, mordeduras de animales y radiaciones.

Para establecer un análisis de riesgo en las poblaciones de trabajadores de SDF, es necesario considerar todos estos riesgos, incluyendo los ergonómicos, físicos, y los actos y condiciones inseguras. Sin embargo, los objetivos de este trabajo se limitan a identificar los riesgos asociados con la exposición a contaminantes atmosféricos y patógenos en los sitios (derivados de la biodegradación de RSU) y agentes microbiológicos en lixiviados. Se consideraron las etapas del proceso de

disposición final de RSU y se identificaron los posibles riesgos mediante visitas a SDF en el Estado de México.

4. Resultados y discusión

Se visitaron 14 SDF, 3 rellenos sanitarios (ReSa) y 11 sitios no controlados (SNC) o tiraderos a cielo abierto, en el periodo comprendido entre marzo y diciembre de 2016. Se identificaron los peligros y sus riesgos (riesgos químicos y biológicos), a través de la visualización de cada etapa desarrollada en los sitios, cada puesto y cada actividad del proceso observado, utilizando como auxiliares un flujograma y un mapeo de riesgos.

En el proceso productivo desarrollado en los ReSa (ver el flujograma con las actividades en la Figura 1), se identificaron 15 etapas para determinar los riesgos, cuyas actividades realizadas en cada una se enlistan a continuación:

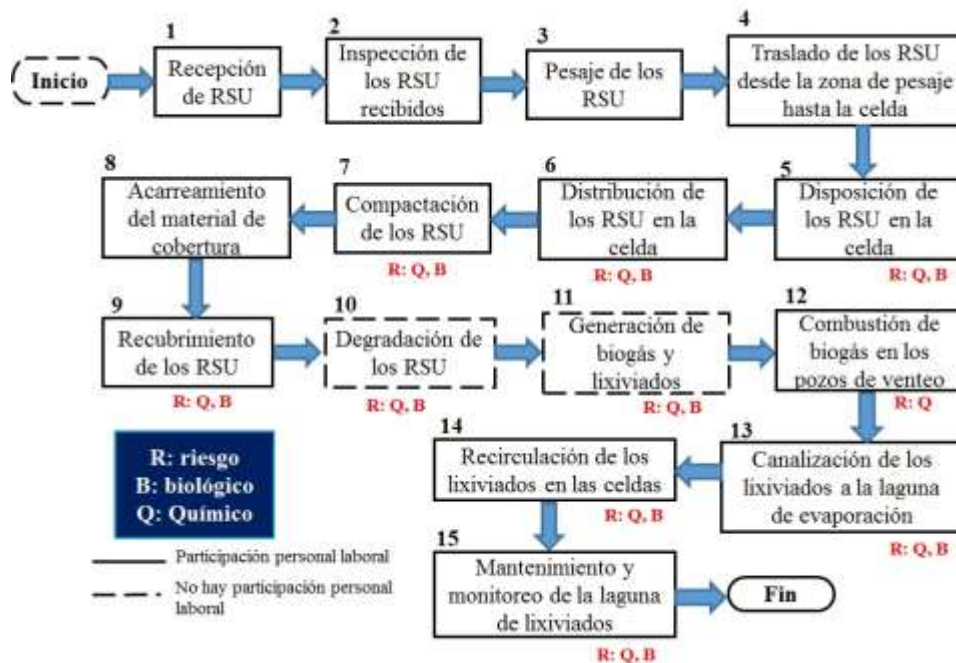


FIGURA 1 ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN UN REsa Y MAPEO DE RIESGOS

En el proceso productivo desarrollado en los SNC (ver el flujograma con las actividades en la Figura 2; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se identificaron 3 etapas para determinar los riesgos, cuyas actividades realizadas en cada una se enlistan a continuación.

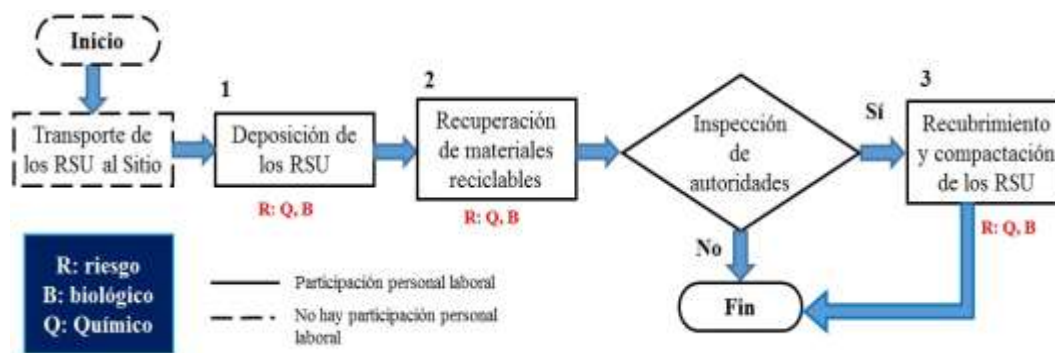


FIGURA 2 ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN UN SNC Y MAPEO DE RIESGOS

Se destaca la diferencia entre los ReSa y los SNC, aunque la gestión de ReSa incluye un mayor número de etapas en el proceso, estas actividades generalmente implican un menor contacto directo con los residuos. En cambio, en los SNC, las actividades se centran en la disposición final de los residuos y la recuperación de materiales valorizables, donde los trabajadores están en contacto y exposición directa con los residuos y los contaminantes gaseosos. Esta distinción es crucial, ya que resalta los diferentes riesgos y desafíos asociados con cada tipo de gestión, lo que requiere enfoques específicos de seguridad y mitigación.

En relación con la emisión de contaminantes y patógenos en el biogás y los lixiviados, se identificaron peligros de tipo biológico y químico. En cuanto a los riesgos biológicos, las rutas de exposición identificadas incluyen la inhalación, ingestión y contacto con la piel y los ojos de los microorganismos presentes en los lixiviados.

De los riesgos químicos, las rutas de exposición encontradas fueron: por la inhalación, ingestión y contacto con la piel y ojos de los componentes del biogás. Se tomaron en cuenta los compuestos más estudiados en la bibliografía internacional debido a su fuerte influencia para desarrollar efectos adversos como daños en órganos vitales o cáncer. Además de su constante aparición en estudios de cuantificación de sustancias emitidas en SDF.

En la Tabla 1, se presentan los posibles efectos adversos que pueden surgir debido a la exposición continua a diversos agentes químicos y biológicos en el entorno laboral. Estos efectos pueden ir desde irritaciones menores hasta enfermedades crónicas graves, dependiendo del tipo y nivel de exposición. En México, la regulación para mitigar estos riesgos es estricta y obliga a los empleadores a implementar medidas preventivas conforme a varias normativas. La NOM-010-STPS-2014 establece los límites máximos permisibles de exposición a contaminantes químicos en el ambiente laboral; la NOM-017-STPS-2010 regula el uso de equipo de protección personal, y la NOM-047-SSA1-2011 define los procedimientos para la vigilancia de la salud de los trabajadores expuestos a agentes químicos. Estas normativas son fundamentales para proteger la salud de los trabajadores, especialmente en industrias donde la exposición a estos agentes es inevitable. No obstante, el cumplimiento efectivo de estas normativas depende tanto de la supervisión gubernamental como de la

responsabilidad empresarial, factores que a veces pueden presentar desafíos en la implementación diaria.

Para entender el vínculo entre los procesos productivos y las enfermedades ocupacionales es necesario realizar un diagnóstico situacional que haga evidentes todos los tipos de riesgos mencionados. A partir de estos riesgos, se determinarían procesos patológicos relacionados e integrarían sus diagnósticos presuntivos y definitivos^[19].

TABLA 1. RECONOCIMIENTO DEL RIESGO PARA TRABAJADORES DE ReSA

Número de etapa	Peligros identificados		
	Tipo	Naturaleza	Efectos potenciales
En ReSa: 5, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 15 y en SNC: 1, 2 y 3	Q	Ácido Sulfhídrico	Irritación, quemaduras, dificultad respiratoria, tos y sofocación.
		Benceno	Leucemia
		Cloruro de vinilo (Cloroetileno)	Cáncer de pulmón, daño al hígado
		Dióxido de carbono	Asfixia
		Etilbenceno	Irritación del tracto respiratorio superior; daño a riñón; nefropatía; daño coclear
		Mercurio (elemental inorgánico)	Daño a sistema nervioso central; daño a riñón
		Metano	Sensibilizante cardiaco; daño a sistema nervioso central
		Tolueno	Daño visual; daño a órgano reproductor femenino; pérdida del embarazo
		Xileno (o-m-p-isómeros)	Irritación del tracto respiratorio superior y ojos; daño a sistema nervioso central
	B	<i>Escherichia coli</i>	Cuadros febriles y diarreicos, infecciones urinarias, biliares, en meninges, etc.
		<i>Klebsiella sp.</i>	Neumonía, infecciones urinarias, artritis inflamatoria degenerativa, infecciones GIT.
		<i>Enterobacter sp,</i>	Infecciones en vías respiratorias, infecciones cutáneas, urinarias, oculares, osteomielitis.

Número de etapa	Peligros identificados		
	Tipo	Naturaleza	Efectos potenciales
		<i>Citrobacter sp.</i>	Infecciones urinarias, ojos, tracto digestivo, etc.), daño a nivel cerebral (Invasión en las células cerebrales humanas endoteliales microvasculares)
		<i>Streptococcus</i>	Infecciones en la piel y mucosas principalmente anginas y faringitis.
		<i>Pseudomona sp.</i>	Infecciones cutáneas leves, otitis externa, ectinema gangrenoso, infecciones oculares, infecciones de tejidos blandos.
		<i>Aspergillus sp.</i>	Onicomycosis, otomycosis, sinusitis alérgica, Aspergilosis pulmonar
		<i>Scedosporium sp</i>	Infecciones en los pulmones, senos, huesos, articulaciones, ojos y cerebro
		<i>Penicillium sp</i>	Fiebre, anemia, adelgazamiento y lesiones de la piel.

Tipo de riesgo: Q: Químico; B: Biológico

Efectos potenciales de los químicos ^[20]

Efectos potenciales de los biológicos ^[21]

5. Conclusiones

Es fundamental realizar una evaluación de riesgos integral que permita identificar y cuantificar las sustancias y microorganismos presentes en el ambiente laboral para reducir los riesgos asociados a su exposición. Cumplir con la normativa mexicana, particularmente con lo estipulado en la NOM-010-STPS-2014, la NOM-017-STPS-2008, y la NOM-047-SSA1-2011, es esencial para, en primer lugar, conocer los agentes que representan un peligro para la salud de los trabajadores y, en segundo lugar, implementar las medidas preventivas y correctivas necesarias. Además, es crucial que el personal ocupacionalmente expuesto, sea del sector formal e informal, estén informados sobre las emisiones generadas tanto dentro como fuera del lugar de trabajo debido al manejo de estos productos. Finalmente, la evaluación de riesgos por emisión de contaminantes químicos y biológicos al ambiente, especialmente en los SDF y su impacto directo en la atmósfera, resulta de gran relevancia para prever los efectos dañinos que podrían

manifestarse a mayor escala, afectando la salud pública, dado que los sitios se presentan en un gran número en el país.

6. Bibliografía

17. Medina, M. "The World's Scavengers: Salvaging for Sustainable Consumption and Production". AltaMira Press, Lanham, MD., Medina, M., 2008. The Informal Recycling Sector. (2007).
18. Castillo-Berthier, H. *El Basurero: Antropología de la Miseria*. 1984.
19. Bernache, G. "The environmental impact of municipal waste management: the case of Guadalajara metro area". 39, 223–237. doi:10.1016/S0921-3449(03)00029-6. (2003).
20. Ojeda-Benitez, S., Armijo-de-vega, C., Ramí, M.E. "Formal and informal recovery of recyclables in Mexicali, Mexico : handling alternatives". *Resour. Conserv. Recycl.* 34, 273–288. (2002).
21. Buenrostro, Otoniel, Liliana Márquez, y F. Pinette. "Consumption patterns and household hazardous solid waste generation in an urban settlement in Mexico". *Waste Management* 28 (2008).
22. An, H., Englehardt, J., Fleming, L., Bean, J. "Occupational health and safety amongst municipal solid waste workers in Florida". *Waste Manag. Res.* 17, 369–377. doi:10.1177/0734242X9901700505. (1999).
23. Poulsen OM, Breum NO, Ebbehøj N, Hansen AM, Ivens UI, van Lelieveld D, Malmros P, Matthiasen L, Nielsen BH, Nielsen EM, et al. "Collection of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes". *Sci Total Environ.* Aug 18;170(1-2):1-19. doi: 10.1016/0048-9697(95)04524-5. PMID: 7569875. (1995).
24. Nieminen, S.M., Kärki, R., Auriola, S., Toivola, M., Laatsch, H., Laatikainen, R., Hyvärinen, A., von Wright, A. "Isolation and Identification of *Aspergillus fumigatus* Mycotoxins on Growth Medium and Some Building Materials Isolation and Identification of *Aspergillus fumigatus* Mycotoxins on Growth Medium and Some Building Materials". *Appl. Environ. Microbiol.* 68, 4871–4875. doi:10.1128/AEM.68.10.4871. (2002).
25. Araki, A., Kanazawa, A., Kawai, T., Eitaki, Y., Morimoto, K., Nakayama, K., Shibata, E., Tanaka, M., Takigawa, T., Yoshimura, T., Chikara, H., Saijo, Y., Kishi, R. The relationship between exposure to microbial volatile organic compound and allergy prevalence in single-family homes. *Sci. Total Environ.* 423, 18–26. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.02.026. (2012).
26. Fiedler, K., Schütz, E., Geh, S. Detection of microbial volatile organic compounds (MVOCs) produced by moulds on various materials. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 204, 111–121. doi:10.1078/1438-4639-00094. (2001).
27. Fischer, G., Albrecht, A., Jäckel, U., Kämpfer, P. Analysis of airborne microorganisms, MVOC and odour in the surrounding of composting facilities and implications for future investigations. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 211, 132–142. doi:10.1016/j.ijheh.2007.05.003. (2008).
28. Fischer, G., Muller, T., Schwabe, R., Ostowski, R., Dott, W. Exposure to airborne fungi, MVOC and mycotoxins in biowaste-handling facilities. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 203, 97–104. (2000).
29. Malta-Vacas, J., Viegas, S., Sabino, R., Viegas, C. Fungal and microbial volatile organic compounds exposure assessment in a waste sorting plant. *J. Toxicol. Environ. Health. A* 75, 1410–7. doi:10.1080/15287394.2012.721175. (2012).
30. Park, D., Lee, K., Ryu, S., Kim, S., Yoon, C., Ha, K. Characteristics of particulate matter generated while handling municipal household waste. *J. Occup. Health* 55, 503–510. (2013).
31. Sasaki, S., Araki, T. Employer e employee and buyer e seller relationships among waste pickers at final disposal site in informal recycling : The case of Bantar Gebang in Indonesia. *Habitat Int.* 40, 51–57. doi:10.1016/j.habitatint.2013.02.003. (2013).

32. Mancheño, M., Izquierdo, M., Martín, A., García, A., Gutiérrez, A., Peinado, A., Heras, M. Exposición laboral a disolventes, 1a ed. Unión sindical de Madrid región de CC.OO., Madrid, España. (2008).
33. Saúz-Gress, A.X. Evaluación ambiental y biológica en POE a disolventes orgánicos en una Metal-mecánica. Propuesta de control. Instituto Politécnico Nacional. (2013).
34. Cárdenas-Moreno, P. "Evaluación de la producción de biogás y lixiviados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos y su efecto sobre la salud y el ambiente". Tesis de Doctorado, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México. (2017).
35. Sánchez-Aguilar, M. Diseño de un método de diagnóstico integral de enfermedades derivadas de los riesgos laborales presentes en procesos productivos. Instituto Politécnico Nacional. (2013).
36. OSHA. Fichas de Datos de Seguridad para la Comunicación de Peligro. Disponible en: https://www.osha.gov/Publications/HazComm_QuickCard_SafetyDataSpanish.html (2012).
37. Brachman, P.S., Abrutyn, E. Bacterial Infections of Humans: Epidemiology and Control, 4th ed, Springer. Springer. doi:10.1007/978-0-387-09843-2_41. (2009).

Análisis multifractal de series temporales la concentración de NO₂ y O₃ en la Ciudad de México en el periodo de 2019 a 2022

Ramírez-Rojas A.¹, Cárdenas-Moreno P.R.¹, Moreno-Torres L.R.¹,

Páez-Hernández R. T¹, Luévano-Enríquez J.R.¹

¹Área de Física de Procesos Irreversibles, Departamento de Ciencias Básicas,
Universidad Autónoma Metropolitana.

arr@azc.uam.mx; prcm@azc.uam.mx, lrmt@azc.uam.mx;

phrt@azc.uam.mx; jrle@azc.uam.mx

1. Resumen

Las emisiones de NO₂ en la Ciudad de México se redujeron repentinamente en marzo de 2020 por causa de la pandemia de Covid-19. No obstante, de acuerdo con la red de monitoreo ambiental de la Ciudad de México, la producción de O₃ troposférico se mantuvo en los mismos niveles previos a la pandemia. En el presente estudio investigamos propiedades dinámicas y multifractales de las series temporales de emisiones de NO₂ y producción de O₃ registradas de 2019 a 2022 (incluyendo el año Covid-19) por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) en la zona Suroeste de la Ciudad de México. Nuestros resultados indican cambios importantes en las correlaciones temporales y en propiedades dinámicas observadas del espectro multifractal para cada periodo estacional en los cuatro años considerados.

2. Introducción

Las altas concentraciones de Dióxido de nitrógeno (NO_2) y Monóxido de carbono (CO) emitidas por vehículos representan dos de los gases contaminantes más importantes en la atmósfera. El NO_2 se deriva de los procesos de combustión de los vehículos, principalmente, de motores de gasolina o diésel, siendo una de las principales fuentes de emisión directa hacia la atmósfera. El NO_2 es directamente reconocido como un efecto potencialmente nocivo y, además, es precursor del Ozono (O_3) troposférico. La acumulación de NO_2 en el cuerpo humano, constituye un riesgo para las vías respiratorias en el proceso inflamatorio como sucede con los polimorfonucleares, macrófagos alveolares y linfocitos, siendo más frecuente en casos de bronquitis crónica ^[1] y otras enfermedades ^[2]. El Ozono troposférico no se emite directamente a la atmósfera, es un contaminante secundario, es producido por una reacción fotoquímica entre emisiones primarias de Óxidos de Nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV) o hidrocarburos (HC) en presencia de radiación solar (ultravioleta). A partir de la fotólisis del NO_2 en NO y Oxígeno reactivo (O), este último reacciona con el oxígeno molecular del aire (O_2) para formar O_3 acoplado al entorno geográfico, climatológico y meteorológico. El tiempo de vida del O_3 en la atmósfera depende de la presencia y abundancia de sus precursores y de las condiciones antes mencionadas, registrándose las mayores concentraciones durante las horas del día en las que se registra la temperatura más alta y siempre los valores pico ocurren durante el día ^[3-5]. El O_3 tiene un tiempo de vida atmosférico relativamente corto ^[6], típicamente de horas, sin embargo, en regiones urbanas contaminadas, donde las concentraciones de sus precursores son altas, su tiempo de vida en la tropósfera libre es del orden de varias semanas ^[7] que representa un tiempo suficientemente largo para que pueda ser transportado en escalas intercontinentales, además de su papel como contaminante prioritario en escala urbana, puede influir en la calidad del aire a escala hemisférica ^[8]. El ozono troposférico también se reconoce como una amenaza para la salud humana ^[6, 9] y tiene un impacto nocivo en la vegetación ^[10], ya que impide a las plantas la absorción de carbono en la biosfera ^[11], así como también impacta en la infraestructura construida ^[12]. La emisión de NO_2 y la producción del O_3 son procesos no lineales que implican comportamientos complejos y posiblemente fuera del equilibrio cuya dinámica no puede ser estudiada mediante la estadística convencional. Para explorar algunas propiedades, como correlaciones a largo alcance, así como patrones invariantes, el análisis se realiza con un enfoque multifractal ^[17] usando el método multifractal basado en el análisis de fluctuaciones sin tendencia (MFDFA, del inglés multifractal detrended fluctuation analysis) aplicado a periodos definidos por las estaciones del año: primavera-verano y otoño-invierno.

3. Condiciones experimentales

3.1 Datos

La red de monitoreo consiste de un conjunto de estaciones remotas manejadas por el programa Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) [18]. Esta red se constituye de un conjunto de monitores que pueden registrar las concentraciones de NO_2 , CO , O_3 , SO_2 . El programa RAMA concentra los conjuntos de datos en cinco zonas: Noroeste (NW), Noreste (NE), Centro (CE), Suroeste (SW) y Sureste (SE) las estaciones para cada zona y las cinco zonas están marcadas, en cada zona, hay estaciones de monitoreo de diferentes contaminantes en las que se pueden registrar concentraciones con una frecuencia de muestreo de 1 hora; el número total de estaciones es 28 como se muestra en la Fig. 1.

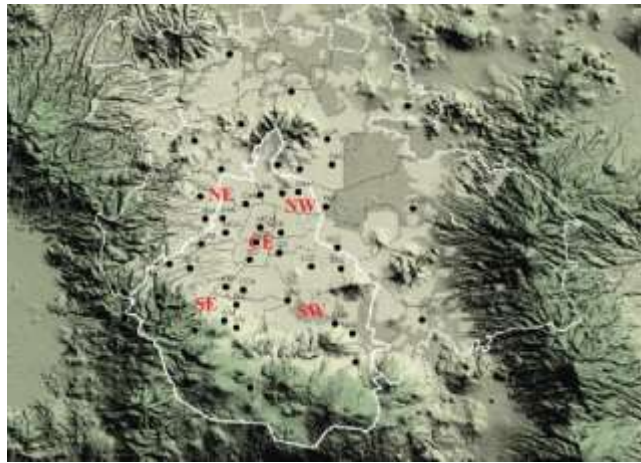
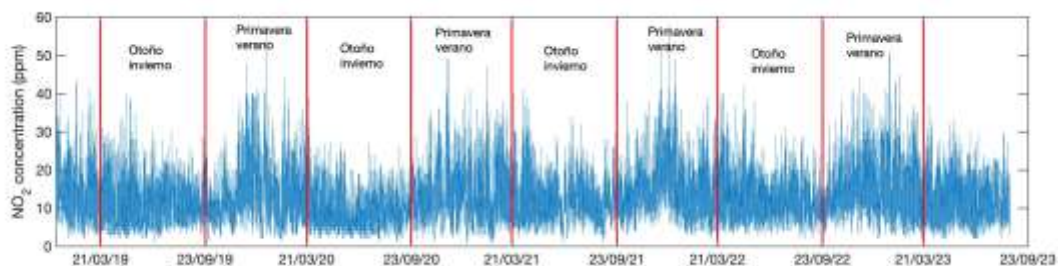
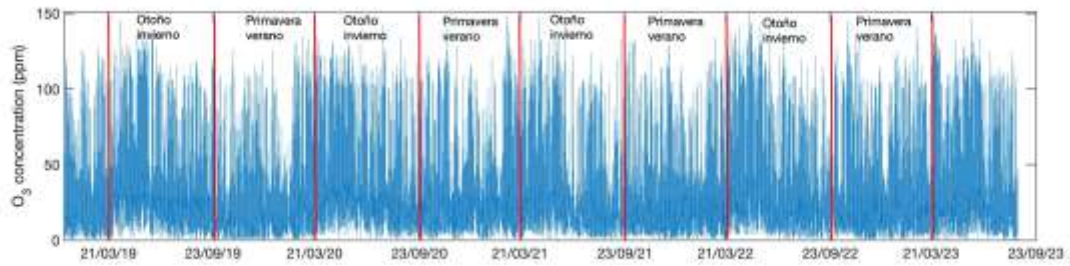


Figura 1. Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) zona metropolitana de la Ciudad de México.

En la Figura 2 se muestran las series temporales de las concentraciones de NO_2 y O_3 . Dichas series están separadas con líneas rojas que sirven para delimitar los periodos estacionales desde 01/01/2019 hasta 23/09/2023.



(a)



(b)

Figura 2. Series de tiempo monitoreadas en la zona suroeste separados en los periodos estacionales primavera-verano y otoño-invierno de (a) NO_2 y (b) Ozono.

3.2 Análisis multifractal.

Las series de tiempo complejas se caracterizan por mostrar invariancia de escalas con propiedades fractales/multifractales y que se describen mediante leyes de potencia. La multifractalidad, se puede revelar a partir del exponente generalizado de Hurst, H_q . El espectro de singularidades o espectro multifractal ^[19] $f(\alpha)$, donde α indica el conjunto de dimensiones fractales subyacentes en la serie de tiempo. De los métodos más usados para obtener el espectro multifractal es el método de Multifractalidad basada en el análisis de fluctuación desestacionalizada (MF-DFA del inglés: multifractal detrended fluctuation analysis), este método permite analizar escalas de tiempo mucho más amplias ^[20]. El método se puede resumir de la siguiente manera.

La idea principal del MFDFA es estimar la función de fluctuación, $F_q(s)$, que representa la variancia de orden q como una función de la escala s . El comportamiento de escalamiento se determina a partir de la relación de la función de fluctuación con la escala s como $F_q(s) \sim s^{H(q)}$ en el plano $\log - \log$. El exponente $H(q)$ ($= H_q$) es una función de q , conocido como exponente generalizado de Hurst y se determina como la pendiente de la recta que ajusta $\log(F_q(s))$ vs $\log(s)$ para cada valor de q . Finalmente, se

puede calcular el espectro de singularidades $f(\alpha)$ con una transformada de Legendre. El procedimiento paso a paso es el siguiente ^[21]:

Determinar el “perfil” de la serie temporal bruta.

$$Y(i) = \sum_{k=1}^i [x_k - \langle x \rangle], \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

donde $\langle x \rangle$ es el valor medio de la serie temporal completa. El perfil $Y(i)$ se divide en $N_s = [N/s]$ ventanas independientes de igual longitud s . Dado que la longitud N de la serie no es necesariamente un múltiplo de la escala temporal considerada s , puede quedar una parte corta al final del perfil. Para no desestimar esta parte de la serie, se repite el mismo procedimiento desde el último hasta el primer valor de la serie. De este modo, se obtienen en total $2N_s$ segmentos.

Para cada una de las $2N_s$ ventanas, se calcula la tendencia local mediante un ajuste de mínimos cuadrados de la serie, y para cada segmento v se puede determinar la varianza, con $n = 1, 2, \dots, N_s$.

$$F^2(s, v) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{ (Y[(v-1)s + i] - y_{v,i})^2 \} \quad (3)$$

Aquí, $y_{v,i}$ es el polinomio de ajuste, de grado m , en el segmento v . La función de fluctuación generalizada de orden q se obtiene como:

$$\left. \begin{aligned} F_q(s) &= \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \{ F^2(s, v) \}^{\frac{q}{2}} \right\}^{\frac{1}{q}}, & (q \neq 0) \\ F_{q \rightarrow 0}(s) \equiv F_0(s) &= \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln [F^2(s, v)] \right\}, & (q = 0) \end{aligned} \right\} \sim s^{H(q)} \quad (4)$$

Cuando $q = 2$ se recupera el procedimiento DFA estándar. El momento q diferencia la estructura de fluctuaciones pequeñas ($q < 0$) y grandes ($q > 0$), así como la monofractalidad y multifractalidad de la serie temporal. Cuando $q < 0$ se amplifican

los segmentos de la serie temporal multifractal con escalas extremadamente pequeñas, mientras que $q > 0$ amplifican los segmentos con escalas extremadamente grandes. La presencia de multifractalidad ocurre cuando se observan escalas diferentes entre fluctuaciones pequeñas y grandes asociado con cada valor de orden q . Cuando $H_q = H$, es independiente de q , la serie temporal es monofractal. Cuando $0 < H < 0.5$ la serie temporal es antipersistente y correlacionada; y para $H > 0.5$ la serie temporal es persistente y correlacionada. Si $H = 0.5$ la serie temporal no está correlacionada [36].

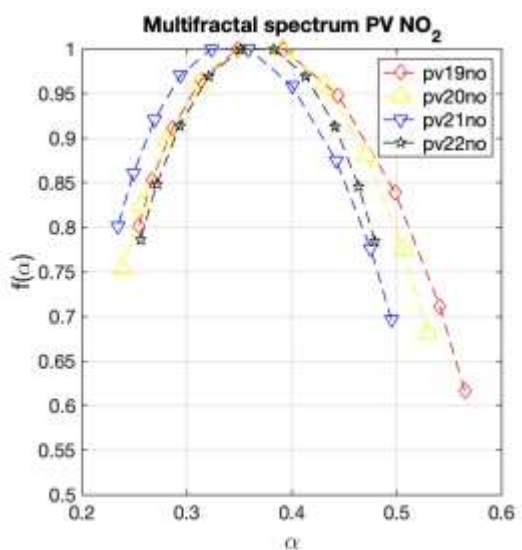
4. Resultados y discusión

Los periodos estacionales de las series temporales de las concentraciones de NO₂ y O₃ (Figura 1) son analizados con la aplicación de MFDFA. Los periodos a analizar son primavera-verano (PV), del 21 de marzo al 22 de septiembre y otoño-invierno (Otlnv) de 23 de septiembre al 20 de marzo. La siguiente Tabla resume los periodos estacionales analizados.

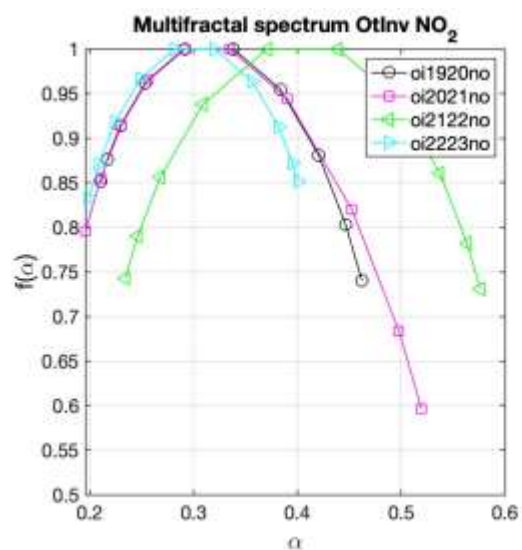
Tabla 1. Periodos estacionales de la Figura 2

	Primavera verano		Otoño invierno
2019	21/03/2019- 22/09/2019	2019- 2020	23/09/2019- 20/03/2020
2020	21/03/2020- 22/09/2020	2020- 2021	23/09/2020- 20/03/2021
2021	21/03/2021- 22/09/2021	2021- 2022	23/09/2021- 20/03/2022
2022	21/03/2022- 22/09/2022	2022- 2023	23/09/2022- 20/03/2023

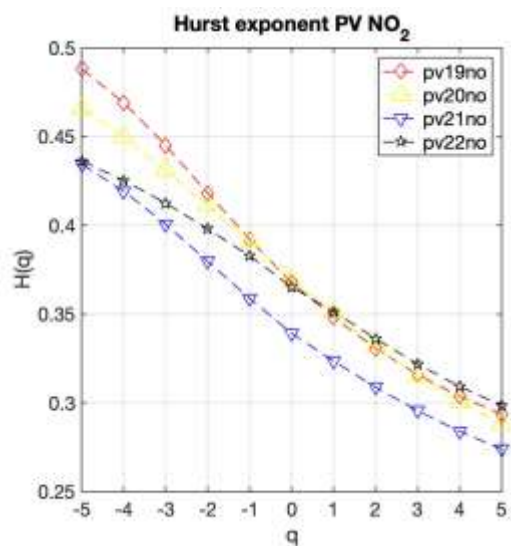
El análisis multifractal de las series de NO₂ se describe en la Figura 3. Los espectros multifractales de las concentraciones correspondientes a PV se muestran en la Figura 3(a) y las de los periodos de Otlnv en la Figura 3(b).



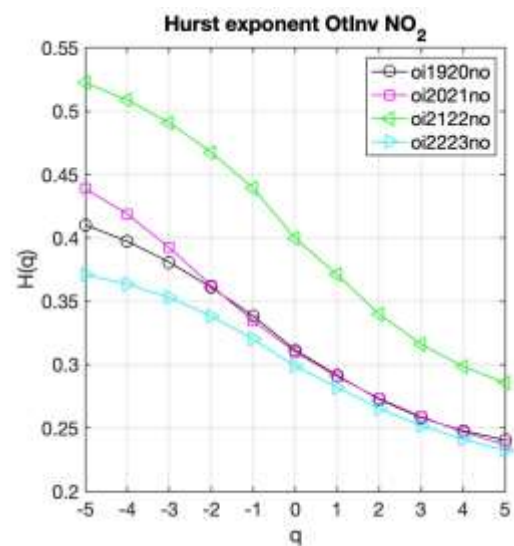
(a)



(b)



(c)

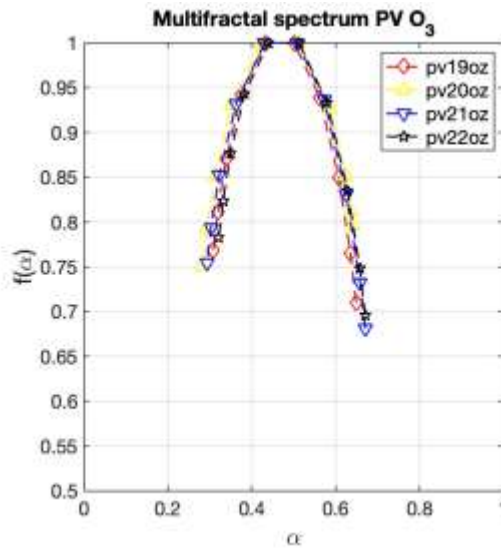


(d)

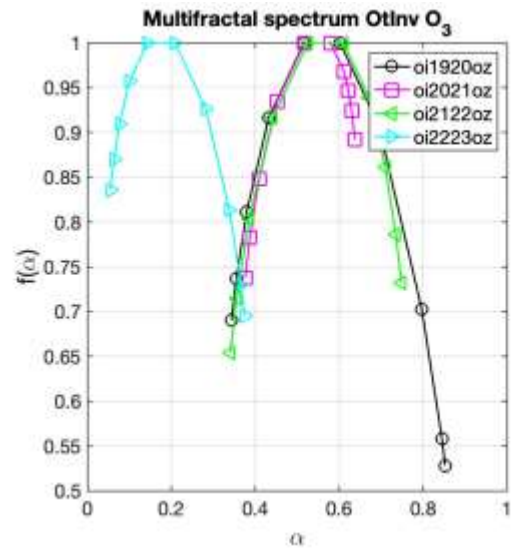
Figura 3. Análisis multifractal de los periodos estacionales de NO_2 . Espectro multifractal y $H(q)$ respectivamente, (a) y (c) Primavera-verano (b) y (d) Otoño-invierno.

Por otro lado, en la Figura 3(c) se presenta el exponente de Hurst generalizado $H(q)$ para las concentraciones de PV y $H(q)$ de los periodos de Otlv en la Figura 3(d).

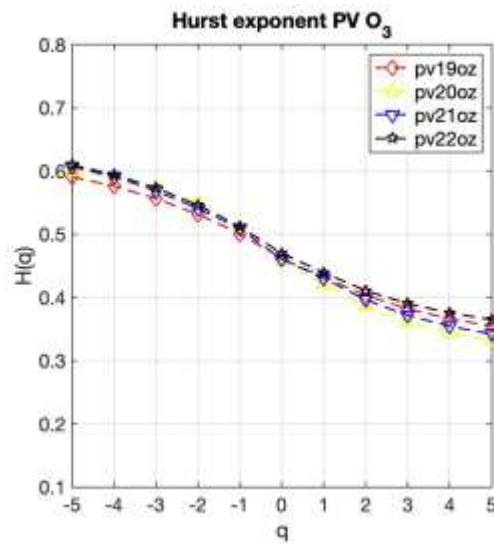
En las Figuras 4(a) y 4(b) se muestran los espectros multifractales de las concentraciones de O_3 que corresponden a los periodos de PV de Otlv respectivamente, mientras que las Figuras 4(c) y 4(d) despliegan el comportamiento del exponente de Hurst generalizado, $H(q)$, en los mismos periodos.



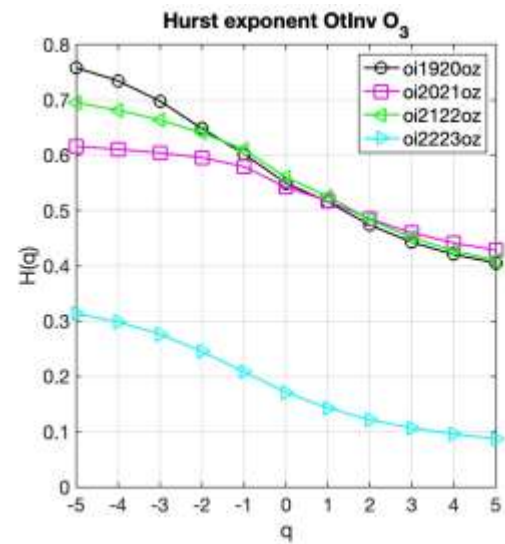
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. Análisis multifractal de los periodos estacionales de O_3 . Espectro multifractal y $H(q)$ respectivamente, (a) y (c) Primavera-verano (b) y (d) Otoño-invierno.

Las diferencias entre los periodos PV con OtlInv son determinadas por las condiciones meteorológicas locales, en la ZMCM. Las principales fuentes de emisión de NO_2 provienen de actividades antropogénicas, principalmente del flujo vehicular, mientras que la producción del O_3 depende, además de los contaminantes primarios (NO_2), de factores meteorológicos como la temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad y dirección de los vientos. Durante los periodos de PV la temperatura y los niveles de radiación tienden a incrementarse. Para el NO_2 , los cambios cualitativos en los espectros multifractales en los periodos de PV muestran solo pequeñas diferencias en cuanto al ancho de los espectros y la dimensión fractal $\alpha_{\text{máx}}$ donde $f(\alpha_{\text{máx}}) = 1$. En los periodos de OtlInv solo se observa un desplazamiento hacia la derecha del espectro en periodo de 2021 a 2022 que correspondió al periodo intermedio de la pandemia. El valor de $\alpha_{\text{máx}}$ en este periodo sugiere que se produjo un incremento en la concentración de NO_2 que posiblemente está asociado al incremento del flujo vehicular debido a la reducción del encierro y el aumento en las actividades económicas. Por otro lado, la Figura 3(c) indica el incremento en las correlaciones temporales. En PV y OtlInv se observa que el comportamiento es representado por procesos del tipo de movimiento Browniano fraccionario (mBf) antipersitentes y correlacionados. Para el proceso observado en OtlInv de 2021 a 2022 se sugiere una pérdida de correlación ya que la curva q vs $H(q)$ es más cercana a $H = 0.5$. Para el comportamiento de la variabilidad de la concentración de O_3 en los diferentes periodos, las Figuras 4(a) y (b) corresponden con los espectros multifractales. En la figura 4(a) se observa que, en los periodos de PV, el comportamiento de O_3 en los diferentes años no hay cambios relevantes, lo que sugiere que los niveles de concentración se mantuvieron sin cambio. En los periodos de OtlInv solo se observa diferencia en el espectro multifractal del periodo de 2022 a 2023, cuando ya estaba terminada la pandemia donde la correspondiente $\alpha_{\text{máx}}$ es menor que en los otros casos lo que indica que el nivel de concentración se redujo. Por otro lado, el comportamiento de q vs $H(q)$ muestra que en este mismo periodo la serie se comporta como un mBf antipersistente. Puede notarse que el comportamiento de la serie temporal del Ozono en el periodo 2020-2021 (año covid-19) muestra un comportamiento más monofractal que los demás periodos.

5. Conclusiones

Las series de tiempo de las concentraciones de NO_2 y O_3 son complejas y despliegan comportamientos multifractales.

Se observa que en los dos casos el comportamiento puede ser modelado por un proceso estocástico del tipo de movimiento Browniano fraccionario (mBf) antipersistente y correlacionado.

En los periodos de PV, los espectros multifractales en ambos casos no se observan cambios importantes.

Para NO_2 , en el periodo de Otlv solo se observa un desplazamiento hacia la derecha del espectro en periodo de 2021 a 2022 que correspondió al periodo intermedio de la pandemia

En el caso de O_3 , se observa diferencia en el espectro multifractal del periodo de 2022 a 2023, cuando ya estaba terminada la pandemia.

Bibliografía

1. Tailing B., Krivenko P., "Blast Furnace Slag- The Ultimate Binder", Chapter 5, Waste Materials used in Concrete Manufacturing. William Andrew Publishing Noyes, 1997.
2. Irassar E. F., Sulfate resistance of blended cement: Prediction and relation with flexural strength, Cem. Concr. Res. V. 20, 209–218 (1990).
3. Ficha técnica cemento clase H-HRS, www.holcimapasco.com.mx
4. Norma ASTM C1012 Length Change of Hydraulic- Cement Mortars exposed to a Sulfate solution.
5. DOF NOM-023-SSA1-1993, NORMA Oficial Mexicana. Salud Ambiental. Criterio Para Evaluar La Calidad Del Aire Ambiente Con Respecto al Bióxido de Nitrógeno (NO_2). Valor Normado Para La Concentración de Bióxido de Nitrógeno (NO_2) En El Aire Ambiente Como Medida de Protección a La Salud de La Población.; 1994;
6. Peters, A.; Dockery, D.W.; Muller, J.E.; Mittleman, M.A. Increased Particulate Air Pollution and the Triggering of Myocardial Infarction. Circulation 2001, 103, 2810–2815, doi:10.1161/01.CIR.103.23.2810.
7. Wałaszek, K.; Kryza, M.; Werner, M. The Role of Precursor Emissions on Ground Level Ozone Concentration during Summer Season in Poland. J Atmos Chem 2018, 75, 181–204, doi:10.1007/s10874-017-9371-y.
8. Aguilar-Velázquez, D.; Reyes-Ramírez, I. A Wavelet Analysis of Multiday Extreme Ozone and Its Precursors in Mexico City during 2015–2016. Atmospheric Environment 2018, 188, 112–119, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.06.017.
9. Wang, Y.; Guo, H.; Zou, S.; Lyu, X.; Ling, Z.; Cheng, H.; Zeren, Y. Surface O_3 Photochemistry over the South China Sea: Application of a near-Explicit Chemical Mechanism Box Model. Environmental Pollution 2018, 234, 155–166, doi:10.1016/j.envpol.2017.11.001.

10. Monks, P.S.; Archibald, A.T.; Colette, A.; Cooper, O.; Coyle, M.; Derwent, R.; Fowler, D.; Granier, C.; Law, K.S.; Mills, G.E.; et al. Tropospheric Ozone and Its Precursors from the Urban to the Global Scale from Air Quality to Short-Lived Climate Forcer. *Atmos. Chem. Phys.* 2015, 15, 8889–8973, doi:10.5194/acp-15-8889-2015.
11. Stevenson, D.S.; Dentener, F.J.; Schultz, M.G.; Ellingsen, K.; Van Noije, T.P.C.; Wild, O.; Zeng, G.; Amann, M.; Atherton, C.S.; Bell, N.; et al. Multimodel Ensemble Simulations of Present-day and Near-future Tropospheric Ozone. *J. Geophys. Res.* 2006, 111, 2005JD006338, doi:10.1029/2005JD006338.
12. Akimoto, H. Global Air Quality and Pollution. *Science* 2003, 302, 1716–1719, doi:10.1126/science.1092666.
13. WHO Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide; Bonn, Germany, 2003;
14. Fowler, D.; Pilegaard, K.; Sutton, M.A.; Ambus, P.; Raivonen, M.; Duyzer, J.; Simpson, D.; Fagerli, H.; Fuzzi, S.; Schjoerring, J.K.; et al. Atmospheric Composition Change: Ecosystems–Atmosphere Interactions. *Atmospheric Environment* 2009, 43, 5193–5267, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.07.068.
15. Sitch, S.; Cox, P.M.; Collins, W.J.; Huntingford, C. Indirect Radiative Forcing of Climate Change through Ozone Effects on the Land-Carbon Sink. *Nature* 2007, 448, 791–794, doi:10.1038/nature06059.
16. Kumar, P.; Imam, B. Footprints of Air Pollution and Changing Environment on the Sustainability of Built Infrastructure. *Science of The Total Environment* 2013, 444, 85–101, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.11.056.
17. Pavón-Domínguez, P.; Plocoste, T. Coupled Multifractal Methods to Reveal Changes in Nitrogen Dioxide and Tropospheric Ozone Concentrations during the COVID-19 Lockdown. *Atmospheric Research* 2021, 261, 105755, doi:10.1016/j.atmosres.2021.105755.
18. SEDEMA Datos Atmosféricos. <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/red-automatica-de-monitoreo-atmosferico>.
19. Feder, J. *Fractals; Physics of Solids and Liquids (PSLI)*; Plenum Press: New York, London, 1988;
20. Cassiani, M.; Stohl, A.; Eckhardt, S. The Dispersion Characteristics of Air Pollution from the World's Megacities. *Atmos. Chem. Phys.* 2013, 13, 9975–9996, doi:10.5194/acp-13-9975-2013.
21. Kantelhardt, J.W.; Zschiegner, S.A.; Koscielny-Bunde, E.; Havlin, S.; Bunde, A.; Stanley, H.E. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Nonstationary Time Series. *Physica A* 2002.

Estudio de correlaciones temporales en series de tiempo de las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno y Ozono troposférico monitoreadas en periodos estacionales durante el año Covid-19 en la Ciudad de México.

Ramírez-Rojas A.¹, Cárdenas-Moreno P.R.¹, Moreno-Torres L.R.¹,

Páez-Hernández R. T¹.

¹Área de Física de Procesos Irreversibles, Departamento de Ciencias Básicas,
Universidad Autónoma Metropolitana.

arr@azc.uam.mx; prcm@azc.uam.mx, lrmt@azc.uam.mx; phrt@azc.uam.mx

1. Resumen

La variabilidad en las concentraciones de contaminantes atmosféricos muestra comportamientos complejos asociados con procesos no lineales, originados tanto por actividades meteorológicas como antropogénicas. Estos procesos pueden desencadenar fenómenos críticos y transiciones de fase, generando leyes de escalamiento que involucran correlaciones de largo alcance y resultan en una dinámica compleja con propiedades fractales. En los últimos años, se han integrado conceptos del análisis de series temporales no lineales y la teoría de redes complejas con enfoques topológicos, lo que ha dado lugar al método de visibilidad gráfica (VG). En este trabajo, aplicamos el método VG para caracterizar las correlaciones temporales en las series de tiempo de concentraciones estacionales de dióxido de nitrógeno y ozono, monitoreadas en la CDMX durante 2019 y 2020. En particular, se estiman la persistencia y las correlaciones temporales a partir de los parámetros obtenidos mediante el método VG.

2. Introducción

La contaminación del aire se produce por un desequilibrio en las concentraciones de los componentes del aire y que se ve favorecida por la creciente presencia de contaminantes primarios y secundarios. Los principales contaminantes primarios son el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el dióxido de azufre (SO₂) entre otros, y que son emitidos en gran parte por la combustión de combustibles fósiles en distintas actividades, no obstante, la emisión de estos contaminantes depende tanto de factores naturales, como de antropogénicos. El ozono troposférico (O₃) es un contaminante secundario y su concentración depende de precursores químicos, como óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOC's) derivados de la actividad urbana e industrial ^[1]. Los mecanismos químicos de formación y destrucción del ozono son procesos fotoquímicos no lineales ^[2, 3] que también dependen de variables meteorológicas como la temperatura, la dirección del viento, las estaciones en el año y principalmente, la radiación solar ^[2, 4], todos estos factores influyen en la concentración de ozono dando lugar a la complejidad de las series de tiempo de la concentración en la tropósfera. Asimismo, es común que las mayores concentraciones de O₃ se presenten durante las horas del día en las que se registran las temperaturas más altas. La permanencia del O₃ en la atmósfera depende de la presencia y abundancia de sus precursores, del entorno geográfico y de las condiciones climatológicas y meteorológicas. En las grandes ciudades la emisión de contaminantes primarios y las altas concentraciones de ozono troposférico ha generado problemas importantes de contaminación atmosférica. La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es una de las áreas urbanas más grandes del mundo que no está exenta de la presencia de diversos contaminantes gaseosos y material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}). El rápido y desordenado crecimiento poblacional en la ZMCM ha incrementado el flujo vehicular y la construcción de áreas

industriales ubicadas dentro de las áreas urbanas, generando graves problemas de salud pública debido a los altos niveles de contaminantes, siendo principalmente el O_3 [5, 6, 7], además de que la ZMCM se encuentra dentro de una cuenca natural rodeada de montañas, lo que representa un impedimento natural para el transporte y dispersión de los contaminantes fuera de la zona urbana [8]. Durante los llamados años 2020 y 2021 (conocidos como años Covid-19), las actividades económicas, vehiculares e industriales se redujeron repentinamente en el mundo. En marzo del año 2020 se detuvieron todas las actividades, siendo la movilidad una de las principales. Esta situación implicó una importante reducción en la emisión de gases contaminantes primarios, sin embargo, los registros de monitoreo ambiental en la ZMCM (Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) [9] mostraron que la concentración del Ozono troposférico no modificó su comportamiento dinámico.

En el marco del análisis estadístico para las series temporales, la estadística tradicional, basada en la determinación de la función de distribución, proporciona una descripción limitada cuando se pretende estudiar la dinámica de las series temporales complejas donde la variabilidad tiene características fractales. Algunas de las razones de dichas limitaciones es que estos métodos aproximan y suavizan la señal mediante el ajuste a funciones, con pérdida de información, además, de que no toman en cuenta el escalamiento del fenómeno físico que se encuentra asociado con las distintas variables involucradas [10]. Por tales razones, otros métodos diseñados para el análisis de series de tiempo complejas deben ser usados, debido a que trabajan directamente con los datos brutos extrayendo información que la estadística convencional no puede identificar. Algunas de las herramientas más útiles son fractales y multifractales ya que se caracterizan por que sus propiedades estadísticas son invariantes de escala [11], propiedad conocida como auto-similaridad. En el caso de las series de tiempo la propiedad equivalente se llama auto-afinidad. De esa manera, un fenómeno natural puede ser caracterizado por medio de parámetros multifractales que permiten identificar propiedades dinámicas como persistencia y correlaciones de largo alcance. Otra de los métodos que han mostrado utilidad para determinar propiedades dinámicas de una serie temporal, como el exponente de Hurst (H), que considera las propiedades topológicas asociadas con grafos y redes complejas.

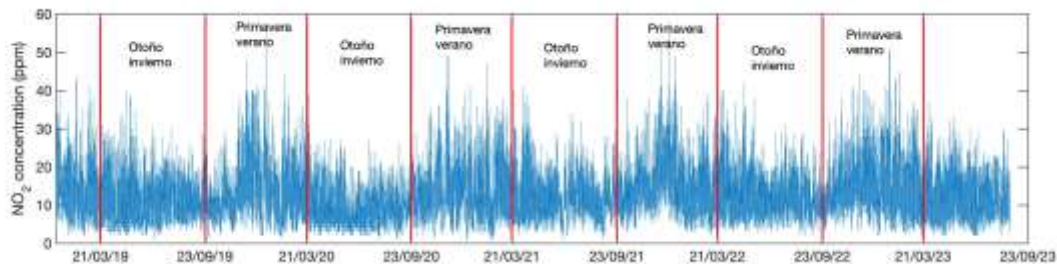
Bajo este argumento, las series temporales se mapean en grafos dirigidos o redes complejas, este método es conocido como visibilidad gráfica (VG), que está basado en que las propiedades topológicas del grafo heredan las propiedades dinámicas de las series temporales asociadas [12]. Mediante este método se pueden determinar varias propiedades de la estructura y la dinámica subyacente en los datos como correlaciones temporales, persistencia y antipersistencia propiedades fractales, entre otras.

En este contexto, en este trabajo se analizan las series de tiempo de NO_2 y del O_3 troposférico registrados por la RAMA y reportados para el periodo de los años de 2019 hasta 2022. Se han considerado las series de tiempo que corresponden con las estaciones primavera-verano (21 de marzo al 22 de septiembre) y otoño-invierno (23 de septiembre al 21 de marzo) con el objeto de identificar posibles diferencias enfatizando las diferencias entre 2019 y 2020. Para ello, las series fueron mapeadas a grafos, luego se determinó la conectividad mediante el grado en cada nodo y se construyó la función de distribución de los grados como una ley de potencia, donde el exponente a esta relación permite identificar los parámetros de interés.

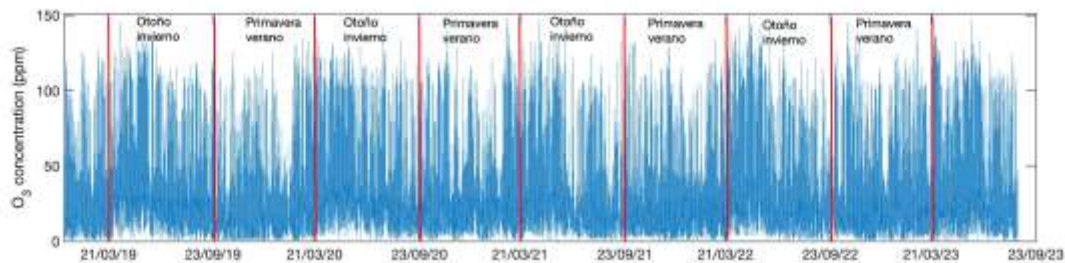
3. Condiciones experimentales

3.1 Monitoreo de Datos

La red de monitoreo está conformada por estaciones remotas del programa Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) ^[9] donde se registra la concentración de diferentes contaminantes. Esta red se distribuye en las cinco zonas de la ZMCM (NO, NE, CE, SO y SE). En cada zona, las estaciones monitorean el nivel de concentración de los contaminantes con una frecuencia de muestreo de 1 hora. Las señales analizadas de las concentraciones de NO₂ y O₃ se muestran en la Figura 1 y corresponden a los años de 2019 y 2020 obtenidos de la zona sur oeste de la ZMCM.



(a)



(b)

Figura 1. Series de tiempo: (a) NO₂ y (b) Ozono

3.2 Visibilidad Gráfica (VG).

La idea principal se basa en la posibilidad de mapear series temporales a grafos y, a partir de las propiedades topológicas de la teoría de grafos, identificar propiedades dinámicas de las series de

tiempo. El mapeo de una serie de tiempo a un grafo depende de alguna condición específica, en este caso, se define una condición de conectividad o visibilidad, en la Figura 2a se muestra la condición de visibilidad. La serie de tiempo es una secuencia de valores de alguna variable que se registra a un tiempo determinado llamado tiempo de muestreo. En la Figura 2a se describen los primeros valores de una serie donde barras verticales representan los valores de la variable medida. Considerando esta representación de la serie de tiempo como un conjunto de columnas, la condición de conectividad o visibilidad significa que cada evento (valor de la serie temporal) puede ver, desde su parte superior en línea recta, el punto más alto de las otras columnas. La posición de cada columna se mapea a un punto sobre una recta, de modo que la serie temporal se transforma en una secuencia de puntos, donde cada uno corresponde a un valor de la serie. La condición de visibilidad determina cuántas columnas pueden ser observadas desde una columna en particular. Así, se construye un grafo conectando los nodos cuyos vértices cumplen con la condición de visibilidad de la serie temporal, como se ilustra en la Figura 2b.

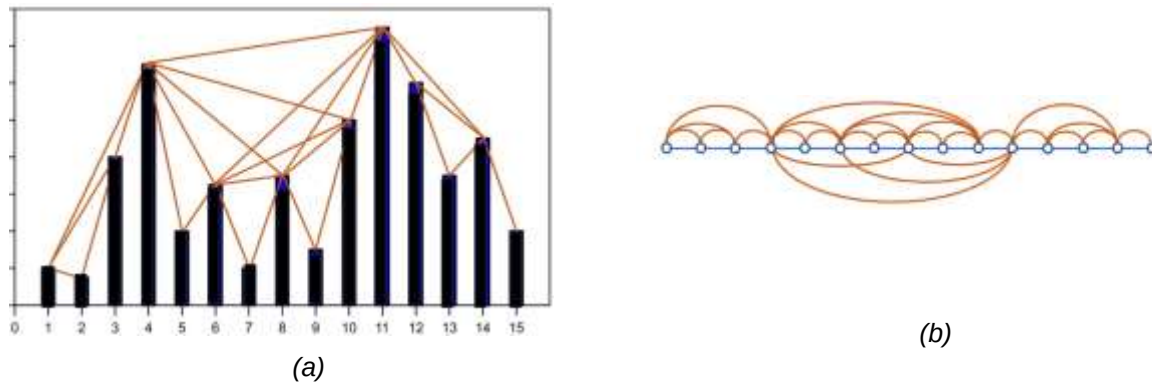


Figura 2. Serie de tiempo (barras). (a) Condición de visibilidad, (b) Grafo asociado con la serie de tiempo.

La condición de visibilidad se define de la siguiente manera: Dados dos valores arbitrarios de la serie que, en consecuencia, se convertirán en dos nodos conexos del grafo asociado, ellos (t_a, y_a) y (t_b, y_b) tendrán visibilidad o están conectados si cualquier dato (t_c, y_c) tal que $t_a < t_c < t_b$ se cumple:

$$y_c < y_b + (y_a - y_b) \frac{t_b - t_c}{t_b - t_a} \quad (1)$$

El grafo extraído de una serie de tiempo es conectado, no dirigido e invariante bajo transformaciones afines de los datos de la serie. De acuerdo con Lacasa et al. (2008) ^[12], el grafo asociado hereda algunas propiedades dinámicas de la serie temporal y, en consecuencia, también del proceso que generó la serie temporal, por ejemplo, las series periódicas se representan en grafos regulares. En este análisis, el parámetro importante es la conectividad medida con el grado k de cada nodo en el grafo, siendo k el número de conexiones que cada nodo tiene con los demás. Con el conjunto de grados de todos los nodos se construye la función de distribución de grados $P(k)$ del grafo. En el método VG, la conectividad resalta las propiedades topológicas del grafo que están asociadas con los procesos subyacentes a la serie de tiempo. Esta información es dada principalmente por el grado k , y

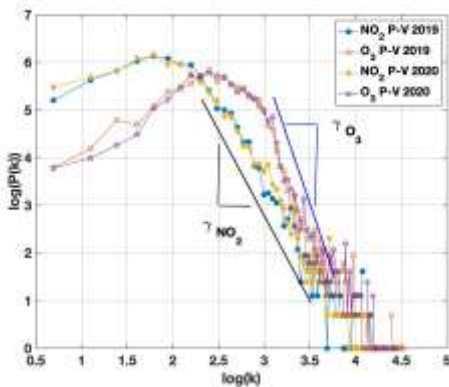
de su función de distribución, $P(k)$. Para diferentes tipos de procesos, $P(k)$ muestra comportamientos específicos; para señales periódicas, VG se transforma como una concatenación de un número finito de motivos porque el período básico es un múltiplo entero de la frecuencia de muestreo. Por otro lado, el caso extremo opuesto es el ruido blanco y para este proceso $P(k)$ se comporta como una función exponencial. Para procesos fractales, la función de distribución de los grados se comporta como una ley de potencia donde se involucra la invariancia de escala mediante la relación:

$$P(k) \propto e^{-\gamma} \quad (2)$$

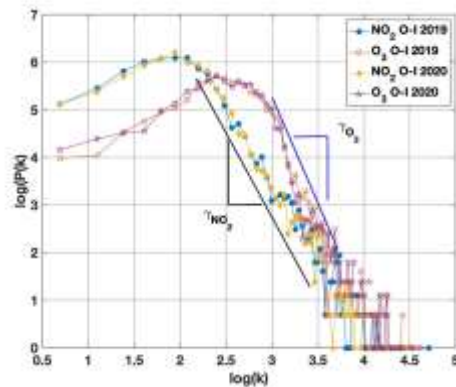
donde el exponente γ está relacionado con el exponente de Hurst H de la serie temporal. Para procesos estocásticos como un movimiento browniano fraccional, se cumple la siguiente relación $\gamma = 3 - 2H$ mientras que para un ruido browniano fraccional se satisface $\gamma = 5 - 2H$ ^[13]. Con base en estas relaciones, es posible estimar parámetros dinámicos como la persistencia, la correlación. Si $0 \leq H < 0.5$ corresponde a un proceso anti-persistente correlacionado. Cuando se observa este comportamiento, las series de tiempo tienen la particularidad de presentar una variabilidad muy irregular. Si $0.5 < H \leq 1$ indica que las series de tiempo son procesos persistentes y correlacionados y presentan un aspecto suave ^[14].

4. Resultados y discusión

En relación con el análisis de visibilidad gráfica, la Figura 3 muestra la distribución de grados (ecuación 2) para las series de primavera-verano comparadas con las de otoño-invierno en los años 2019 y 2020. Los valores de los exponentes γ se obtienen mediante un ajuste lineal de $\log(k)$ vs $\log(P(k))$. Esta relación puede ser satisfecha por todo el conjunto de escalas o solamente por un subconjunto del mismo.



(a)



(b)

Figura 3. Distribución $P(k)$ vs k en el plano log-log. Las líneas representan las regiones de validez de la Ec. 2: (a) Periodos de primavera verano de 2019-2020 y (b) Periodos de otoño invierno de 2019-2020

Una vez calculadas las distribuciones de grados de las diferentes estaciones, se observa un claro comportamiento fractal ya que todas ellas siguen la ley de potencia, (ecuación (2)) como era de esperar, con una parte lineal en la última parte del gráfico log-log. Tras calcular la pendiente para los valores de $k \geq 130$ en todos los casos, se puede determinar el parámetro γ , obteniéndose que, para las series de NO_2 los valores menores se observan durante las estaciones del 2019 incrementándose ligeramente en el año 2020 como se muestra en la Tabla 1. Para los valores calculados del exponente γ de las series de las estaciones del O_3 , se muestra el valor más grande en el periodo de primavera-verano del 2020 con respecto a los demás periodos. De manera comparativa, se observa que el exponente γ alcanzó valores más grandes en el año 2020 (año Covid-19) comparados con los valores obtenidos en el año 2019. Estos resultados muestran que la distribución de los grados de las series asociadas con las estaciones muestra invariancia de escala lo que sugiere que los procesos involucrados no son aleatorios. Se puede observar que los exponentes de las series del NO_2 son menores que para las series del O_3

Tabla 1. Valores del exponente γ

γ	Primavera Verano 2019	Otoño invierno 2019	Primavera Verano 2020	Otoño invierno 2020
NO_2	3.12	3.17	3.20	3.24
O_3	3.62	3.72	3.86	3.78

La clase de proceso se puede determinar mediante la relación $\gamma = 3 - 2H$. En la Tabla 2 se resumen los valores del exponente Hurst H que identifica el proceso estocástico asociado a cada una de las series analizadas.

Tabla 2. Valores del exponente γ

$\gamma = 3 - 2H$	Primavera Verano 2019	Otoño invierno 2019	Primavera Verano 2020	Otoño invierno 2020
NO_2	0.06	0.08	0.1	0.12
O_3	0.31	0.36	0.43	0.39

En todos los casos se muestra un comportamiento de procesos anti-persistentes con $0 < H < 0.5$. Los valores de H asociados con la emisión de NO_2 durante el año 2019 indica una dinámica del

tipo ruido blanco, mientras que, en el 2020, se observa un aumento en la correlación en los dos periodos. Por otro lado, los valores de H asociados con la producción de ozono en el 2019 muestran anti-persistencia con una correlación de largo alcance, y en el año 2020 (año Covid-19) esta anti-persistencia creció al inicio de la pandemia (marzo de 2020).

Por otro lado, la correlación entre los grados k de cada nodo y la respectiva concentración se muestra en las figuras 4 y 5 para las series de NO₂ y O₃ respectivamente. Estas correlaciones se estimaron para todas las estaciones de los cuatro años (2019-2022).

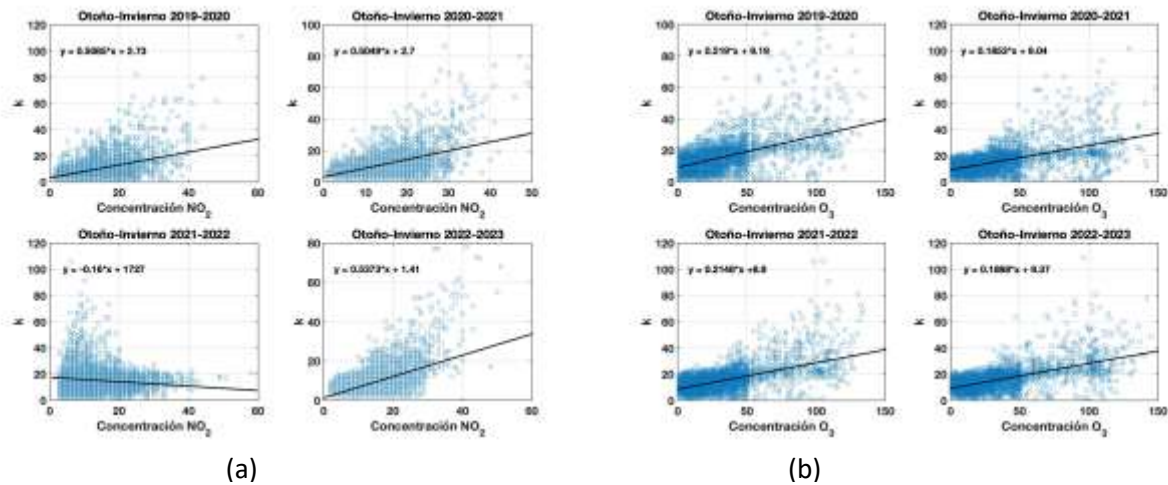


Figura 4. Correlación entre concentración vs k. Las líneas representan los ajustes lineales (a) periodos otoño- invierno de NO₂ y (b) periodos otoño- invierno de O₃.

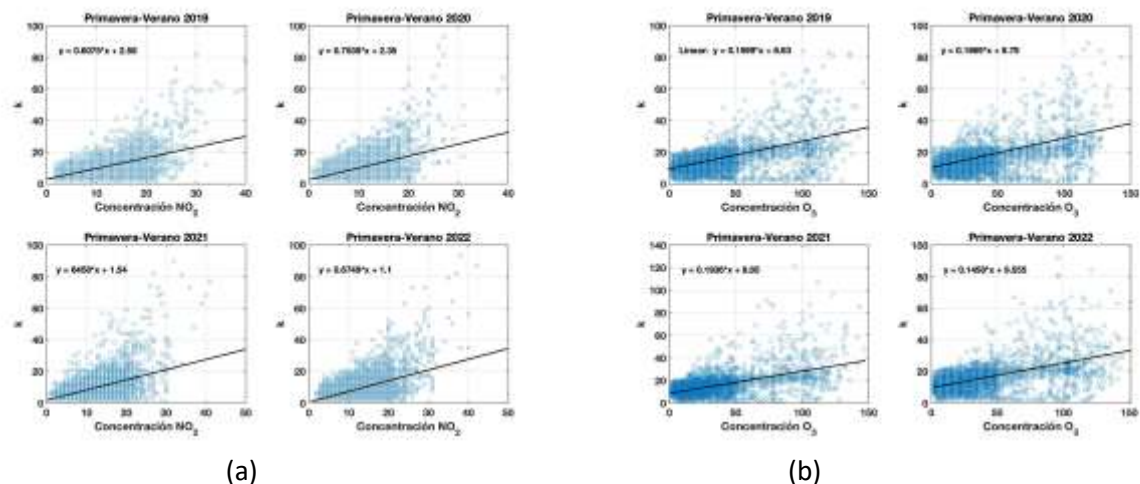


Figura 5. Correlación entre concentración vs k. Las líneas representan los ajustes lineales (a) periodos primavera-verano de NO₂ y (b) periodos primavera-verano de O₃.

Para caracterizar las propiedades topológicas y de las concentraciones entre el grafo y la actividad de los contaminantes se introduce el plano k-C, equivalente al plano k-M introducido por Telesca et al. (2013) ^[15, 16] para estudiar la actividad sísmica. En el contexto de este trabajo, el plano k-C representa la conectividad en función de las concentraciones medidas. La pendiente de la recta asociada con la relación funcional k-C se obtiene como el ajuste cuadrático medio de la línea recta en el plano k-C. El hecho de que la pendiente de la recta en el plano k-C sea positivo indica una correlación positiva, sin embargo, se observa que el valor de la pendiente es menor que la unidad en todos los casos lo cual indica que para concentraciones altas la conectividad es baja.

5. Conclusiones

Estos resultados muestran que la distribución de los grados de las series asociadas con las estaciones muestra invariancia de escala, lo que sugiere que los procesos involucrados no son aleatorios. Se puede observar que los exponentes de las series del NO₂ son menores que para las series del O₃.

Para estimar el exponente de Hurst asociado a un movimiento Browniano fraccionario ^[13], a partir del exponente γ usamos la relación $\gamma = 3 - 2H$, en la Tabla 2 se muestran los valores del exponente de Hurst H , donde se observa que las series temporales se comportan como movimiento Browniano fraccionario anti-persistente correlacionado, esto quiere decir que, describe una dinámica en la que las concentraciones tienden a mostrar un comportamiento fluctuante con correlaciones de largo alcance. La emisión de contaminantes atmosféricos, al ser emitidos por una serie de fuentes amplias y constantes presentan ese tipo de comportamientos complejos, ya que las concentraciones actuales de los contaminantes están influenciadas por valores pasados, pero con una tendencia a autocorregirse, a pesar de la antipersistencia, los valores de la serie de tiempo pueden estar correlacionados.

Con relación a la correlación determinada en el plano k-C que representa la conectividad en función de las concentraciones medidas, se observa la pendiente de la recta en el plano k-C sea positivo indica una correlación positiva, sin embargo, el valor de la pendiente es menor que la unidad en todos los casos indicando que para altas concentraciones la conectividad es baja.

6. Bibliografía

38. Sillman, S., 1999. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmos. Environ.* 33, 1821–1845. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00345-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00345-8).
39. Graedel, T.E., Crutzen, P.J., 1993. *Atmospheric Change: An Earth System Perspective*.
40. Trainer, M., Parrish, D.D., Goldan, P.D., Roberts, J., Fehsenfeld, F.C., 2000. Review of observation-based analysis of the regional factors influencing ozone concentrations. *Atmos. Environ.* 17.
41. Guicherit, R., van Dop, H., 1977. Photochemical production of ozone in Western Europe (1971–1975) and its relation to meteorology. *Atmos. Environ.* 11, 145–155. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(77\)90219-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(77)90219-0).
42. Molina, L.T.; Madronich, S.; Gaffney, J.S.; Apel, E.; De Foy, B.; Fast, J.; Ferrare, R.; Herndon, S.; Jimenez, J.L.; Lamb, B.; et al. An Overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City Emissions and Their Transport and Transformation. *Atmos. Chem. Phys.* 2010, 10, 8697–8760, doi:10.5194/acp-10-8697-2010.
43. Garzón, J.P.; Huertas, J.I.; Magaña, M.; Huertas, M.E.; Cárdenas, B.; Watanabe, T.; Maeda, T.; Wakamatsu, S.; Blanco, S. Vol-atile Organic Compounds in the Atmosphere of Mexico City. *Atmospheric Environment* 2015, 119, 415–429, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.08.014.
44. Baklanov, A.; Molina, L.T.; Gauss, M. Megacities, Air Quality and Climate. *Atmospheric Environment* 2016, 126, 235–249, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.11.059.
45. Cassiani, M.; Stohl, A.; Eckhardt, S. The Dispersion Characteristics of Air Pollution from the World's Megacities. *Atmos. Chem. Phys.* 2013, 13, 9975–9996, doi:10.5194/acp-13-9975-2013.
46. SEDEMA Datos Atmosféricos 2024. <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/red-automatica-de-monitoreo-atmosferico>
47. Lacasa, L., Luque, B., Ballesteros, F., Luque, J., Nuño, J.C., 2008. From time series to complex networks: the visibility graph. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 4972–4975. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709247105>.
48. Mandelbrot, B. *The Fractal Geometry of Nature*; Tusquets, 1999
49. Lacasa, L., Luque, B., Ballesteros, F., Luque, J., Nuño, J.C., 2008. From time series to complex networks: the visibility graph. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 105, 4972–4975. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709247105>.
50. Lacasa, L., Luque, B., Luque, J., Nuño, J.C., 2009. The visibility graph: a new method for estimating the Hurst exponent of fractional Brownian motion. *EPL* 86, 30001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/86/30001>.
51. Quintero y Ruiz, *Revista Geomagnética*, 5, 2011
52. Telesca, L.; Lovullo, M.; Ramirez-Rojas, A.; Flores-Marquez, L. Investigating the time dynamics of seismicity by using the visibility graph approach: Application to seismicity of Mexican subduction zone. *Phys. A Stat. Mech. Appl.* 2013, 392, 6571–6577.
53. Ramírez-Rojas, A.; Flores-Márquez, E.L.; Vargas, C.A. Visibility Graph Analysis of the Seismic Activity of Three Areas of the Cocos Plate Mexican Subduction Where the Last Three Large Earthquakes ($M > 7$) Occurred in 2017 and 2022. *Entropy* 2023, 25, 799. <https://doi.org/10.3390/e25050799>

Determinación de condiciones experimentales óptimas para la Remoción de fluoruro de aguas subterráneas sintéticas empleando calcita

1. Resumen

El exceso del ión fluoruro (F^-) en aguas subterráneas puede ser perjudicial para la salud. La calcita ha mostrado ser un adsorbente efectivo para su eliminación, por lo que el presente estudio se centró en optimizar variables como pH, tamaño de partícula, concentración de F^- y presencia de fosfato para mejorar la adsorción de F^- por calcita en ensayos en lote. Los resultados indicaron que un pH ácido (3.5) favorece la remoción de F^- , posiblemente por adsorción superficial y formación de CaF_2 . Las partículas de calcita de tamaño intermedio (0.727 mm) demostraron ser las más eficientes, con una capacidad de adsorción de 0.588 mg F^- /g calcita empleando una concentración inicial de 20 mg F^- /L. Además, el fosfato favoreció la eliminación del F^- presuntamente por formar fluorapatita. La optimización de estos parámetros mejoró la eficacia de la calcita nativa de Chihuahua para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con fluoruro.

2. Introducción

El agua subterránea es la fuente predominante de abastecimiento público en México con el 56.7% del volumen total^[1]; sin embargo, en regiones del norte país como Chihuahua, Durango y Coahuila, el 98.5% del agua para consumo humano proviene de fuentes del subterráneas^[2], lo cual resalta la importancia de asegurar el correcto manejo de ellas, así como su calidad.

La composición del agua subterránea puede cambiar de acuerdo con los tipos de formaciones geológicas con las que interactúa, las rutas subterráneas y la cantidad de precipitación en el ambiente^[3]; a medida que el agua fluye a través del suelo, elementos como B, As, Fe, F, Mn, Pb, entre otros, pueden disolverse e incrementar su concentración en aguas^[4].

El flúor es uno de los componentes del agua subterránea más estudiados debido a su relevancia clínica; en el ambiente se puede encontrar formando minerales en el suelo y sedimentos, o en su forma aniónica de F^- , la cual favorece su disponibilidad en el agua^[5,6]. El consumo prolongado de agua con altas concentraciones de F puede provocar fluorosis, lo cual favorece la aparición de padecimientos como parálisis posparto, corrosión estomacal, daño en las células hepáticas y renales, infertilidad y desarrollo de defectos de nacimiento^[7]. Por esta razón, la Organización Mundial de la Salud, así como la Normatividad Mexicana estableció que el límite máximo permisible en agua de consumo humano no debe exceder el 1.0 mg/L F^[8].

Considerando los problemas de salud provocados por la presencia de F en agua, es importante proponer alternativas para su remoción y control de una manera eficiente y práctica. Dentro de los tratamientos fisicoquímicos, se ha observado que la calcita tiene la habilidad de remover iones F a través de adsorción en su superficie debido a interacciones electrostáticas o por precipitación formando CaF_2 en ambientes ácidos^[9,10].



Se ha reportado con anterioridad que la calcita de alta pureza, con partículas de 150 μm removió del 90 al 99% de 3 a 2100 mg/L de F presentes en agua subterránea sintética ^[11]. Otro estudio mostró que, al tratar un agua con 4 mg/L F utilizando rocas nativas con calcita de alta pureza, se obtuvo un 65% de remoción ^[12]. A su vez, se ha enfatizado que la acidificación previa de la calcita con ácidos orgánicos como acético y cítrico, reduce la concentración de F de 10 a 1.5 mg/L después de 12 horas de contacto, sin provocar alteraciones en la calidad del agua y manteniendo el pH entre 5.7 y 7.0 ^[13].

Existen diferentes factores que juegan un papel clave en la remoción de F por adsorción con calcita. Dentro de ellos se encuentra el pH, debido a que diversos estudios refieren una influencia directa sobre la carga superficial del material ^[14]. Otra variable que normalmente se evalúa es el tamaño de partícula del adsorbente, ya que se ha observado que, conforme el tamaño de partícula aumenta, la tasa de adsorción disminuye ^[15]. La concentración inicial del contaminante es, a su vez, un parámetro importante a considerar para conocer las posibles proyecciones en campo y la determinación de la capacidad adsorbente del material (q) ^[16]. Por último, la presencia de algunos aniones como el fosfato (PO_4^{3-}) han reportado influir en el proceso de remoción de F^{-} debido a que compiten por los sitios activos en la superficie del adsorbente, inhibiendo la eliminación del contaminante ^[17].

Conociendo lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar las condiciones óptimas de pH, tamaño de partícula y concentración inicial de contaminante, así como el efecto de la presencia de fosfato en la remoción de fluoruro de aguas subterráneas sintéticas usando calcita como material adsorbente, así como la calidad del agua previo a su disposición en el ambiente.

3. Condiciones experimentales

La calcita empleada en los ensayos es nativa de la zona norte de Chihuahua, Chih., México, obtenida por el grupo de trabajo en un estudio previo ^[18]. El material colectado se trituró en un molino de bolas y luego se separó en tamices de malla 8 y 25, identificados en el texto como M8 y M25, respectivamente. Adicional a esto, una fracción de la muestra M25 se pasó por un pulverizador de discos a 100 mallas, con la finalidad de disminuir el tamaño de partícula (aproximadamente 0.05 mm) y se rotuló como MP25. El área específica, diámetro de poro y tamaño de partícula para cada muestra del material, se presentan a continuación (Tabla 1).

TABLA 2. TAMAÑO DE PARTÍCULA, ÁREA ESPECÍFICA Y DIÁMETRO DE PORO DE MUESTRAS EMPLEADAS EN ENSAYOS DE ADSORCIÓN.

Muestra	Tamaño de partícula promedio (mm)	Área específica (m ² /g)	Diámetro de poro (nm)
M8	2.5	0.802	3.12
M25	0.727	1.362	3.10
MP25	0.045	1.845	1.56

Con el fin de conocer las condiciones óptimas del sistema con calcita para la remoción de F de aguas subterráneas sintéticas (ASS), se evaluaron varios parámetros: pH, tamaño de partícula, concentración inicial de F⁻ y presencia de fosfato en las aguas, procedimientos que se describen y representan a continuación (Figura 1).



FIGURA 1. ESQUEMATIZACIÓN DE PRUEBAS PARA EVALUAR EL EFECTO DE pH, TAMAÑO DE PARTÍCULA Y CONCENTRACIÓN INICIAL DE F SOBRE SU REMOCIÓN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS SINTÉTICAS.

3.1 Efecto del pH sobre la remoción de F empleando calcita

De acuerdo con la literatura, los cambios en el pH del sistema pueden alterar la capacidad de remoción de ciertos materiales adsorbentes ^[19,14,20]. Por ello, se realizaron ensayos por triplicado en recipientes de 60 mL, donde se probaron tres rangos de pH: 3.5, 5.5 y 6.5; estos fueron rotulados de acuerdo con el tiempo de contacto y el tratamiento. A cada recipiente se le añadió 33.33 g/L de las partículas M25 de calcita, agua subterránea sintética preparada de acuerdo con la literatura^[21] y la cantidad necesaria de una solución stock de 100 mg/L F, para alcanzar una concentración final de 10 mg/L F. El pH a evaluar se ajustó mediante la adición de HCl y/o NaOH 0.1M. Las pruebas se realizaron por sacrificio con agitación constante de 200 rpm, a 25°C y se tomaron en los tiempos 0.0, 12.0, 24.0 y 36.0 horas.

3.2 Efecto del tamaño de partícula sobre la remoción de F empleando calcita

El uso de diferentes tamaños de partícula ha demostrado modificar la capacidad de remoción de F debido a las variaciones en el área superficial y el número de sitios de adsorción en el material^[16]. Por ello, se evaluó el efecto del tamaño de partículas de calcita (M8, M25 y MP25) en la remoción de F.

El ensayo se realizó por triplicado en recipientes de 60 mL, rotulados de acuerdo con el tratamiento y su tiempo de contacto; en cada recipiente se añadió 33.33 g/L de la calcita con el tamaño a evaluar, agua subterránea sintética con pH ajustado a 3.5 y 2 mL de una solución de 100 mg/L F para alcanzar una concentración final de 10 mg/L F. Las pruebas se realizaron por sacrificio, a 25°C y agitación constante de 200 rpm, tomando muestras en los tiempos 0.0, 12.0, 24.0 y 36.0 horas.

3.3 Efecto de la concentración inicial de F sobre su remoción empleando calcita

Con el fin de conocer el alcance del sistema para su aplicación en aguas subterráneas que cumplan con las características planteadas y así asegurar su funcionamiento en campo, se probaron cuatro concentraciones distintas de fluoruro para evaluar su efecto en la remoción del contaminante: 1.5, 5.0, 10.0 (máxima concentración reportada en aguas de Chihuahua) y 20.0 mg/L.

El ensayo se llevó a cabo por duplicado en recipientes de 60 mL y en cada uno se añadió 33.33 g/L de calcita M25, agua subterránea sintética ajustada a pH 3.5 y la cantidad necesaria de las diferentes soluciones stock para alcanzar la concentración de F a evaluar. Al igual que en las pruebas anteriores, el estudio se hizo por sacrificio, agitación de 200 rpm y 25°C de temperatura. Los recipientes se tomaron en los tiempos 0.0, 12.0, 18.0 y 24.0 h.

En todos los casos, se incluyeron controles para el monitoreo del ensayo, los cuales se describen en cada apartado. Al concluir el tiempo de contacto, se tomaron 15 mL de la fase acuosa y se centrifugaron a 7,200 rcf por 20 min. Posteriormente, se transfirieron 5 mL a un vial nuevo donde se diluyó 2x en TISAB II con el objetivo de mantener la fuerza iónica constante y un pH adecuado para la medición. La determinación de fluoruros se llevó a cabo empleando un electrodo de ion selectivo para fluoruros marca Thermo Fisher modelo 9606BNWP. Tanto los estándares como las muestras se

trataron de la misma manera y la concentración del anión se estimó mediante una curva de calibración de 0.5 a 15 mg/L.

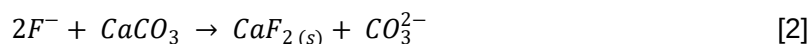
4. Resultados y discusión

Previo a los ensayos de adsorción, se realizó un análisis de distribución de tamaño de partícula, así como la determinación del área específica de cada muestra mediante un estudio BET, resultados que se muestran arriba en la Tabla 1.

4.1 Remoción de F empleando calcita a diferente pH

El pH es uno de los factores más importantes para los procesos de adsorción. En los ensayos se utilizó agua subterránea sintética con 10 mg F /L y 33.33 g/L de calcita M25; ajustados a pH de 3.5, 5.5 y 6.5, mediante la adición de HCl y/o NaOH 0.1M. Se emplearon dos controles distintos: uno con ASS con el pH a evaluar, 10 mg/L F y sin calcita (CSC), y otro con agua destilada al pH a evaluar, 33.33 g/L calcita M25 y 10 mg/L F⁻ (CAD). La remoción del F⁻ respecto al tiempo para cada pH se muestra en la Figura 2, donde se observa que en el pH 3.5, la concentración disminuye de 11.3 a 0.27 mg/L en 36 h, mientras que para el pH 5.5 la concentración baja de 11.36 a 2.03 mg/L, y en pH 6.5, de 11.2 a 9.23 mg/L. Esto resultó en una eficiencia de remoción de 97.5, 81.19 y 17.48%, respectivamente. En reportes previos se ha observado que, en medios ácidos, pueden existir dos vías para la eliminación del F⁻: La primera considera su adsorción en la superficie del material debido a que, al aumentar las cargas positivas en el ambiente, se produce la atracción de F⁻ debido a fuerzas electrostáticas [22]. Sin embargo, al aumentar el pH, la calcita alcanza su punto de carga cero teóricos (7.2 – 10.5), lo cual provoca la disminución de cargas positivas para remover F; además, al incrementarse el número de iones OH⁻, se puede presentar competencia por lo sitios de adsorción [23].

Otra vía de eliminación del F⁻ es vía precipitación por su interacción con cationes, donde la disolución de calcita por el ácido del ambiente provoca la liberación de calcio, formándose fluoruro de calcio (CaF₂)



Esto justifica por qué la mayor eliminación de F⁻ se muestra en el pH 3.5 (97.5%) y, conforme aumenta el pH de 5.5 y 6.5, la eficiencia disminuye (81.19 y 17.48%, respectivamente). Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado en trabajos previos [24], donde se evaluó el efecto del pH en la remoción de F dentro de un rango de

3.0 a 11.0, observando que el 96% del ion añadido se eliminó a un pH de 3.0 y la eficiencia disminuyó hasta alcanzar pH 7.0. Por encima de este, los porcentajes de remoción caen significativamente, lo cual se atribuye a la competencia que existe entre los iones F^- y OH^- por los sitios de adsorción. Aunado a ello, el incremento de pH en el sistema también puede afectar la remoción por precipitación ya que, al disminuir la concentración de iones H^+ , se dificulta la disolución de la calcita y esto provoca que la cantidad de iones Ca^{2+} sean insuficientes para interactuar con los iones F^- , mermando los resultados de remoción [25]. Por otro lado, en el análisis del control CSC se observó que, los componentes del agua subterránea sintética por sí mismos, no provocan la remoción del F de la matriz acuosa y destaca la importancia de la presencia de la calcita. Sin embargo, el comportamiento del control CAD fue similar al control anterior, lo cual sugirió que alguno de los constituyentes del ASS en presencia del material favorece la remoción del anión.

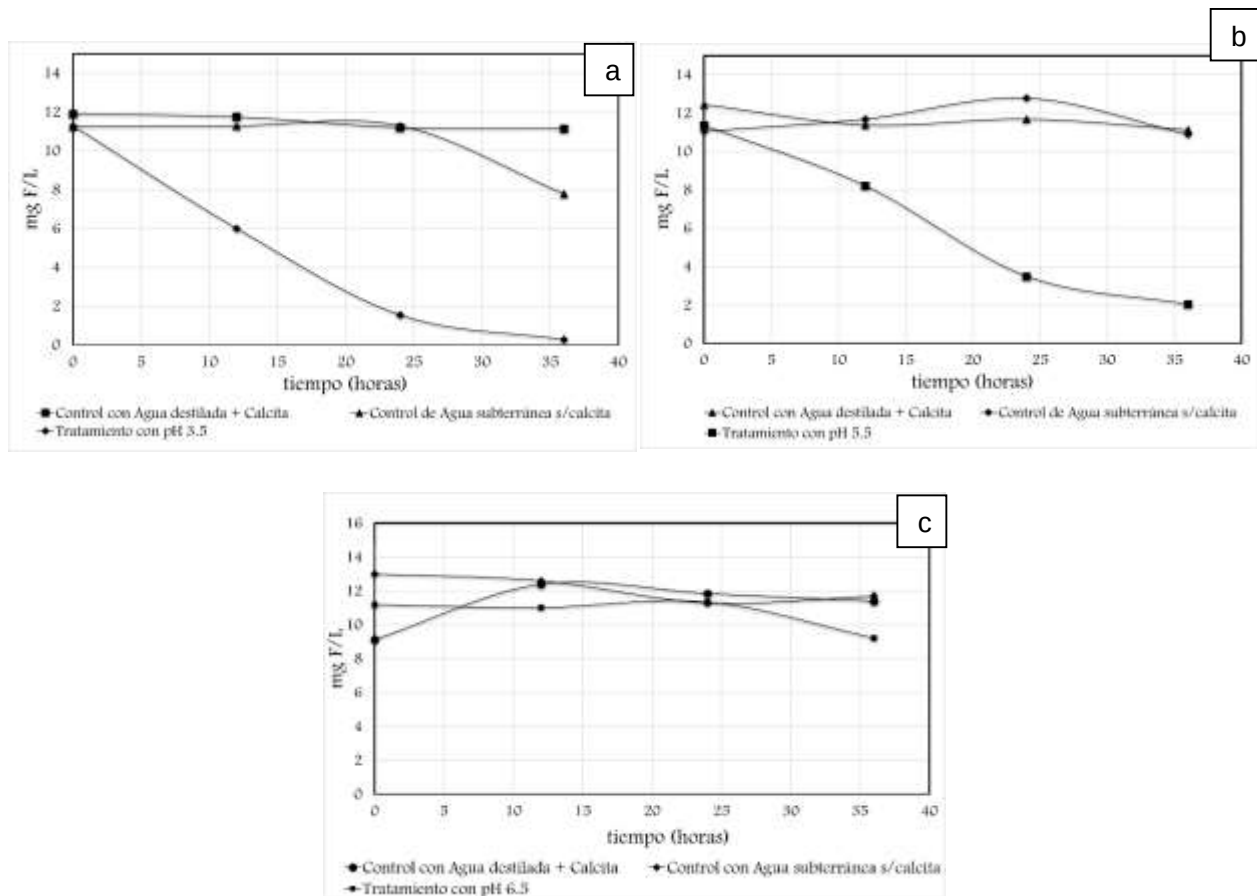


FIGURA 2. CONCENTRACIÓN DE F RESPECTO AL TIEMPO A PH DE A) 3.5, B) 5.5 Y C) 6.5.

4.2 Efecto del tamaño de partícula sobre la remoción de F empleando calcita

El tamaño de partícula de los adsorbentes ha mostrado tener un papel de gran importancia en la eficiencia de remoción del F. Por esta razón se probaron tres tamaños de partícula diferente (en mm): M25 (0.727), M8 (2.5) y MP25 (0.05), con una concentración inicial de 10 mg F/L, 33.33 g/L calcita y pH 3.5. Al igual que en el ensayo anterior, se emplearon los controles CAD y CSC. La concentración de F respecto al tiempo para cada tratamiento se muestra en la Figura 3, donde es claro que las partículas más grandes (M8) removieron menos F, disminuyendo de 9.39 a 7.74 mg/L, que corresponde al 14.56%. Por su parte, las partículas de tamaño medio (M25) redujeron de 10 a 0.05mg F/L, que equivale a un porcentaje de eliminación >97%. Mientras que, en las partículas más pequeñas (MP25), la concentración del F⁻ prácticamente permaneció constante durante todo el ensayo.

En estudios previos^[25], donde se utilizó calcita cubierta con hidroxiapatita en columna de lecho fijo de flujo continuo y en el cual se probaron partículas con tamaño variable entre 0.05 y 5 mm, concentración fija de 5 mg/ F y 40g de masa, se observó que los mejores rendimientos se obtuvieron con el adsorbente de menor tamaño de partícula (0.005 a 0.1 cm); este desempeño se asoció a la disponibilidad de área superficial. Esto concuerda con los resultados obtenidos, ya que las partículas M25 removieron mayor cantidad de F que las M8, lo cual se asocia a su área superficial de 1.362 m²/g contra 0.802 m²/g de las M8 y a la cantidad de número de sitios activos disponibles para ser ocupados por átomos de F⁻ ^[26]. Sin embargo, a pesar de que las partículas MP25 poseen un área específica de 1.845 m²/g que es mayor a la de las partículas M25 y M8, la eficiencia de remoción obtenida fue inferior. Es posible que, debido al tamaño de la partícula, haya ocurrido aglomeración durante el tratamiento, a pesar de la velocidad de agitación que se estaba administrando, lo cual pudo provocar la reducción de superficie específica para el contacto entre la calcita y el F, alterando la cinética y la capacidad de adsorción ^[27]. Además, es posible que hayan existido cambios en la distribución de tamaño de poro, lo cual afecta la accesibilidad de las moléculas a los sitios activos y provoca una adsorción menos uniforme. En el caso de los controles, se observó el mismo comportamiento que en el análisis anterior, por lo que se probaron diferentes composiciones del ASS para conocer el posible efecto de alguno de los componentes en los ensayos de remoción (para fines prácticos, no se muestran esos resultados en este artículo).

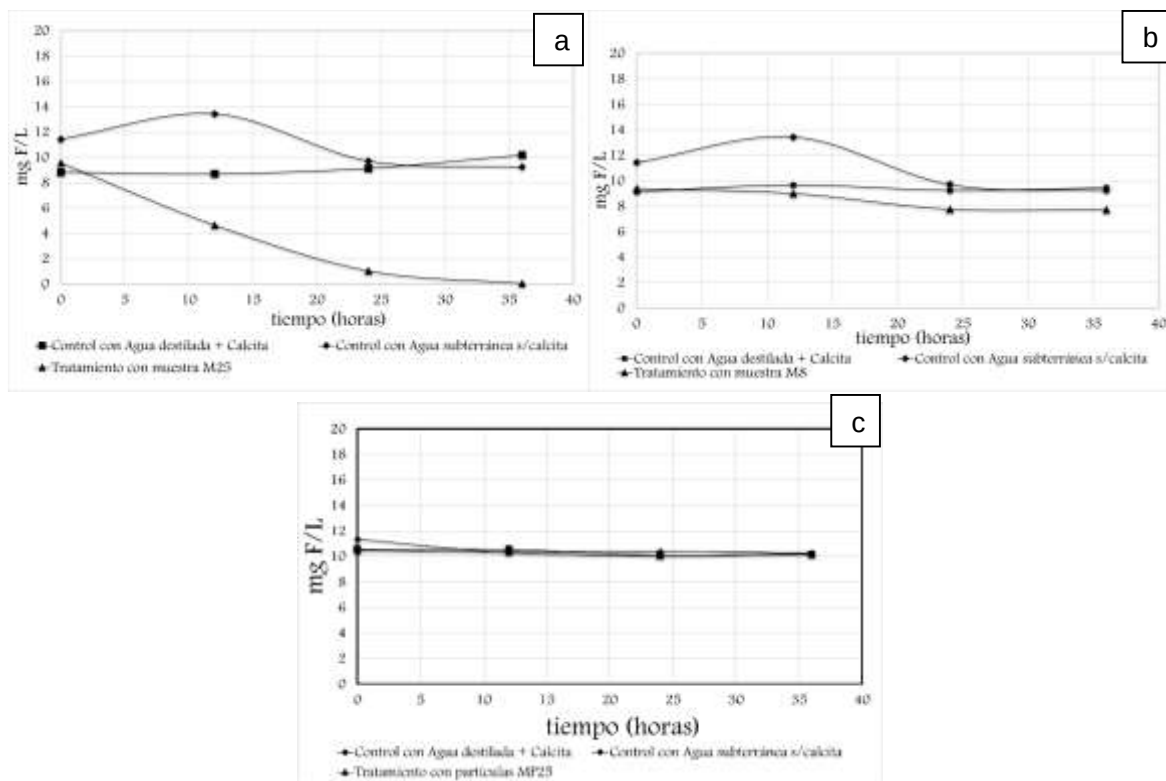


FIGURA 3. CONCENTRACIÓN DE F RESPECTO AL TIEMPO EN TRATAMIENTOS CON PARTÍCULAS (A) M25, (B) M8 Y (C) MP25.

4.3 Efecto de la concentración inicial de F sobre su remoción empleando calcita

A fin de conocer el alcance del sistema para su aplicación en aguas subterráneas de diferentes características, se probaron cuatro concentraciones iniciales de F para evaluar su efecto en la remoción del contaminante: 1.5, 5.0, 10 y 20 mg/L, empleando 33.33 g/L de calcita M25 a pH de 3.5, dado que esta removi6 más F. Como control, se emple6 se utiliz6 agua subterránea con calcita sin F y otro con calcita y F, pero sin fosfato (ASF). Los cambios en la cantidad de F respecto al tiempo de contacto, se muestra en la Figura 4.a. El tratamiento con 1.5 mg/L de fluoruro mostr6 que el porcentaje de remoci6n aumenta conforme al tiempo de contacto, alcanzando el 94.14% de la eliminaci6n del an6n en 24 h; en este mismo lapso, el tratamiento con 5.0 mg/L F mostr6 una reducci6n de 6.07 a 0.096 mg/L F, equivaliendo al 98.43% del total y, para el sistema con 10 mg/L F, se registr6 la eliminaci6n del 94.84% del an6n. Al final, la m6xima remoci6n en el tratamiento con 20 mg/L F se logr6 a las 18 h con el 84.42% de remoci6n. Es destacable que, a excepci6n del tratamiento de 20 mg/L, todos los sistemas concluyeron con una

concentración inferior al límite máximo permisible marcado por la NOM-127-SSA1-2021, lo cual confirma su efectividad en aguas subterráneas que posean estas características.

Con estos resultados, se estimó el efecto de las concentraciones sobre la capacidad de adsorción (Figura 4.b), observando que, al aumentar la concentración inicial de F de 1.5 a 20 mg/L, así mismo aumenta la capacidad de adsorción de 0.049 a 0.588 mg F/g calcita. La cantidad del anión que se remueve por unidad de masa está en función de la concentración inicial y final por lo que, al incrementar la dosis inicial de F, aumenta también la remoción de F por unidad de masa ^[28]. Esto es posible debido a que el número de iones disponibles del anión es superior a altas concentraciones permitiéndole mayor interacción con los sitios de adsorción en la superficie y así ser retenidos ^[29].

Por último, es destacable que, en el control sin fosfato, no existen cambios aparentes en la concentración del F⁻ a comparación de los tratamientos convencionales que sí lo contenían. Acorde con estudios previos^[30], la presencia de calcita en un sistema con fosfato y fluoruro fomenta la remoción simultánea de ambos componentes debido a la formación de fluorapatita; esto sucede debido a que, en medio ácido, se promueve la formación de CaF₂ y, a su vez, se alcaliniza el medio. Al alcanzar un pH neutral, inicia la formación de fluorapatita, ya que aumenta la estabilidad y se forma el mineral.

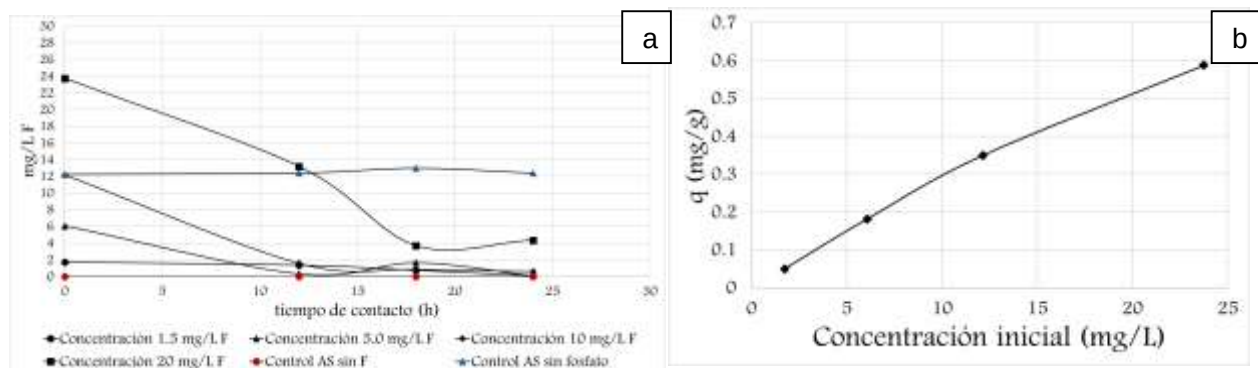


FIGURA 4. (A) CAMBIOS EN LAS DISTINTAS CONCENTRACIONES DE F A EVALUAR RESPECTO AL TIEMPO EN ENSAYOS DE REMOCIÓN Y (B) SU EFECTO SOBRE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN (AS: AGUA SUBTERRÁNEA).

5. Conclusiones

La evaluación del efecto de diferentes parámetros en la remoción de F de aguas subterráneas sintéticas, indicó que un pH 3.5 favorece la eliminación del contaminante respecto al tiempo en comparación con los pH de 5.5 y 6.5, lo cual puede atribuirse a la precipitación en forma de CaF₂ y mediante adsorción en la superficie. Por otra parte, el

análisis del efecto del tamaño de partícula reveló que las partículas M25 lograron mayor porcentaje de remoción comparado con las partículas M8, asociado a la mayor área superficial de las primeras. Contrariamente, las partículas MP25 de menor tamaño y mayor área superficial, removieron menos F que las M25, posiblemente por la aglomeración de partículas durante el ensayo. El estudio del efecto de la concentración inicial de F mostró que la capacidad de adsorción del sistema aumenta conforme incrementa la concentración del anión, reportando 0.588 mg F/g calcita para 20 mg/L F añadidos. A excepción de la concentración más alta de F, los tratamientos registraron concentraciones finales inferiores a las establecidas por la Normatividad Mexicana e internacional. Por último, la presencia de fosfato en el agua subterránea fomentó la eliminación del anión debido a su precipitación en forma de fluorapatita.

La eficiencia de la calcita nativa de la región de Chihuahua en las condiciones óptimas mejoró significativamente su eficiencia del sistema para el tratamiento real de aguas subterráneas contaminadas con altas concentraciones de fluoruro.

6. Bibliografía

1. CONAGUA. (2019). Estadísticas del Agua en México 2019. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/PDF/EAM_2019.pdf
2. CONAGUA. (2014). Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía: Ciudad de Chihuahua, Chihuahua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99847/PMPMS_Chihuahua__Chih.pdf
3. Ortega, F. A. (2008). Problemática de la calidad del agua. 86–90.
4. Water Science School. (2018). Contamination of Groundwater | U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/contamination-groundwater>
5. Jha, S. K., Mishra, V. K., Sharma, D. K., & Damodaran, T. (2011). Fluoride in the environment and its metabolism in humans. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 211, 121–142.
6. Podgorski, J., & Berg, M. (2022). Global analysis and prediction of fluoride in groundwater. *Nature Communications* 2022 13:1, 13(1), 1–9.
7. Hu, Y., You, M., Liu, G., & Dong, Z. (2021). Spatial distribution and potential health risk of fluoride in drinking groundwater sources of Huaibei, Anhui Province. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11.
8. Secretaría de Gobernación (2022) Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

9. Hart, P. W., Colson, G. W., & Burris, J. (2013). Application of carbon dioxide to reduce water-side lime scale in heat exchangers. *Pulp and Paper Canada*, 114(1), 21–24.
10. Vargas, E. (2012). Estudio de la disminución de la concentración de fluoruros presentes en soluciones de regeneración de hidróxido de sodio. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.
11. Turner, B. D., Binning, P., & Stipp, S. L. S. (2005). Fluoride removal by calcite: 441 Evidence for fluorite precipitation and surface adsorption. *Environmental Science 442 and Technology*, 39(24), 9561–9568.
12. Labastida, I., Armienta, M. A., Beltrán, M., Caballero, G., Romero, P., & Rosales, M. 444 A. (2017). Limestone as a sustainable remediation option for water contaminated 445 with fluoride. *Journal of Geochemical Exploration*, 183(December), 206–213.
13. Nath, S. K., & Dutta, R. K. (2010). Fluoride removal from water using crushed limestone. *Indian Journal of Chemical Technology*, 17(2), 120–125.
14. Lopes, L. P. C., Macena, M., Esteves, B., & Guiné, R. P. F. (2021). Ideal pH for the adsorption of metal ions Cr 6 + , Ni 2 + , Pb 2 + in aqueous solution with di ff erent adsorbent materials. *Open Agriculture*, 115–123.
15. Sadasivan, P., Harikumar, P., Jaseela, C., & Megha, T. (2012). Defluoridation of water using biosorbents. *Natural Science*, 4(December), 245–251.
16. Di, J., Ruan, Z., Zhang, S., Dong, Y., Fu, S., Li, H., & Jiang, G. (2022). Adsorption behaviors and mechanisms of - Pb 2 + by magnetically modified lignite. *Scientific Reports*, 12, 1–18.
17. Bhatnagar, A., Kumar, E., & Sillanpää, M. (2011). Fluoride removal from water by adsorption-A review. *Chemical Engineering Journal*, 171(3), 811–840.
18. Zacarías-Estrada, O. L., Ballinas-Casarrubias, L., Montero-Cabrera, M. E., Loredó-Portales, R., Orrantía-Borunda, E., & Luna-Velasco, A. (2020). Arsenic removal and activity of a sulfate reducing bacteria-enriched anaerobic sludge using zero valent iron as electron donor. *Journal of Hazardous Materials*, 384(October 2019).
19. Adelou, A. T., Okareh, O. T., & Dada, A. O. (2015). Adsorption of Chromium Ion from Industrial Effluent Using Activated Carbon Derived from Plantain (Musa paradisiaca) Wastes. *American Journal of Environmental Protection*, 4(May), 7–20.
20. Yang, Y., Li, X., Gu, Y., Lin, H., Jie, B., Zhang, Q., & Zhang, X. (2022). Adsorption property of fluoride in water by metal organic framework : Optimization of the process by response surface methodology technique. *Surfaces and Interfaces*, 28(October 2021).
21. Karri, S., Sierra-Alvarez, R., & Field, J. A. (2005). Zero valent iron as an electron-donor for methanogenesis and sulfate reduction in anaerobic sludge. *Biotechnology and Bioengineering*, 92(7), 810–819.

22. Gogoi, S., & Dutta, R. K. (2016b). Mechanism of fluoride removal by phosphoric acid-enhanced limestone: equilibrium and kinetics of fluoride sorption. *Desalination and Water Treatment*, 57(15), 6838–685.
23. Ke, F., Peng, C., Zhang, T., Zhang, M., Zhou, C., Cai, H., Zhu, J., & Wan, X. (2018). Fumarate-based metal-organic frameworks as a new platform for highly selective removal of fluoride from brick tea. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11.
24. Gogoi, S., & Dutta, R. K. (2016a). Fluoride removal by hydrothermally modified limestone powder using phosphoric acid. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 1040–1049.
25. Mohan, R., & Dutta, R. K. (2020). Journal of Environmental Chemical Engineering Continuous fixed-bed column assessment for de fluoridation of water using. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103840.
26. Gregg, S. J., & Sing, K. S. W. (1982). *Adsorption, surface area, and porosity*. Academic Press.
27. Pietsch, Ullrich & Holy, Vaclav & Baumbach, Tilo. (2004). High resolution X-ray scattering from thin films and lateral nanostructures.
28. Abin-bazaine, A. A., Ríos, G. S. A. L., Santellano-estrada, E., & Rodríguez-piñeros, S. (2019). Copper Removal by Acid-Conditioned Zeolite , Part I : Equilibrium , and Numerical Simulations. *Journal of Environment and Earth Science*, 9(3), 16–38.
29. Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, A., & Osorio-García, L. (2020). Estudio del efecto de la temperatura, concentración inicial de contaminante y dosis de adsorbente en la remoción de Níquel (II) usando residuos agroindustriales. *Prospectiva*, 18(1).
30. Kanno, T., & Horiuchi, J. (2015). Simultaneous Removal Behavior of Phosphate and Fluoride Ions in the Presence of Scallop Shell. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 48(4).

Evaluación de la fertilidad de suelos cafetaleros, en el municipio de Huatusco, Veracruz.

Díaz Jiménez, B. A.¹, Barceló Quintal, I. D.¹,
Solís Correa H.E.¹, García Albortante, J.¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Depto. de Ciencias
Básicas

badj@azc.uam.mx, idbg@azc.uam.mx, hsoliscorrea@yahoo.com.mx,
jga@azc.uam.mx

1.Resumen

Se analizaron las características fisicoquímicas de 11 muestras de suelos cafetaleros, del municipio de Huatusco, Veracruz, con el objetivo de evaluar las condiciones de fertilidad de los suelos antes del trasplante de la planta de café. Los resultados obtenidos fueron: tendencia ácida en todas las muestras; la textura fue franco-arenosa; el porcentaje de materia orgánica osciló entre 4.8% y 10.2%. Se analizó la concentración de potasio, calcio, hierro, manganeso, aluminio y cobre por espectrofotometría de absorción atómica de llama; el fósforo se cuantificó mediante el método de Bray y Kurtz 1 con espectrofotometría UV-Visible, y el Nitrógeno empleando la técnica micro Kjeldahl. En comparación con la literatura se encontró que la concentración de los micronutrientes es adecuada; se determinaron concentraciones insuficientes de Nitrógeno y Fósforo en todas las muestras. Por lo que la fertilización en dichos suelos debe tomar en cuenta como factor principal estos nutrientes para la correcta fertilización de los suelos cafetaleros.

2.Introducción

La fertilidad del suelo y el suministro adecuado de nutrientes son factores cruciales para el cultivo exitoso del café, uno de los productos agrícolas más valiosos y de mayor demanda en el mercado global. Los suelos cafetaleros, que suelen encontrarse en regiones montañosas, como la zona de Huatusco, Veracruz, requieren una atención especial en cuanto a su gestión y nutrición para garantizar una producción óptima de granos de café de alta calidad.

La fertilidad del suelo se refiere a la capacidad de este para proporcionar los nutrientes esenciales que las plantas necesitan para crecer y desarrollarse, esta puede ser natural y adquirida, la primera hace referencia a las condiciones propias de los suelos y existe un equilibrio suelo/vegetación, en la segunda se asocia a suelos cultivados que han tenido intervención por el uso de abonos. Un desequilibrio o deficiencia de estos nutrientes puede resultar en rendimientos bajos, plantas débiles y granos de menor calidad. Cada planta requiere una proporción de nutrientes: macro (C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S) y micro (Fe, Mn, B, Mo, Cu, Zn, Cl) distinta a las demás en función de la especie, variedad, etapa del desarrollo y nivel de producción ^[1].

En el caso del café, los nutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes juegan roles fundamentales en el desarrollo de las raíces, el crecimiento vegetativo, la formación de flores y la calidad del fruto ^[2].

El cultivo del café en México ha mantenido al país entre los principales diez productores de café del mundo, siendo líder en la producción orgánica. A partir de 2015 se han registrado caídas hasta del 32% en la cosecha, lo cual significa una pérdida económica para las familias cafecultoras ^[3].

La calidad del café es un factor influyente en la venta del producto, para lograr un cultivo de alta productividad y calidad en la cosecha, el suelo se debe adecuar física y químicamente antes de la siembra y durante el crecimiento de la planta, en función de las propiedades del suelo conocidas y las de referencia ^[4], así mismo la dinámica del

suelo, la rotación de cultivos y las prácticas de conservación contribuyen a mejorar la salud de este a largo plazo.

Por lo que determinar los macronutrientes, micronutrientes de los suelos cafetaleros, permitirá realizar ajustes en las prácticas de fertilización en suelos cafetaleros.

3. Condiciones experimentales

3.1 Muestreo de suelos cafetaleros y preparación de la muestra

El muestreo de suelos se realizó en Huatusco, municipio ubicado en la zona central del estado de Veracruz, colindante con Puebla al norte y con los municipios de Totutla, Sochiapa y Comapa, al este con Zentla, al oeste con Coscomatepec y al sur con Tepatlaxco e Ixhuatlán del Café. La altitud comprende los 400 y 2000 m sobre el nivel del mar, clima semicálido húmedo con lluvias todo el año en un (48%) y semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano en un (42%) ^[5] (Figura 1).

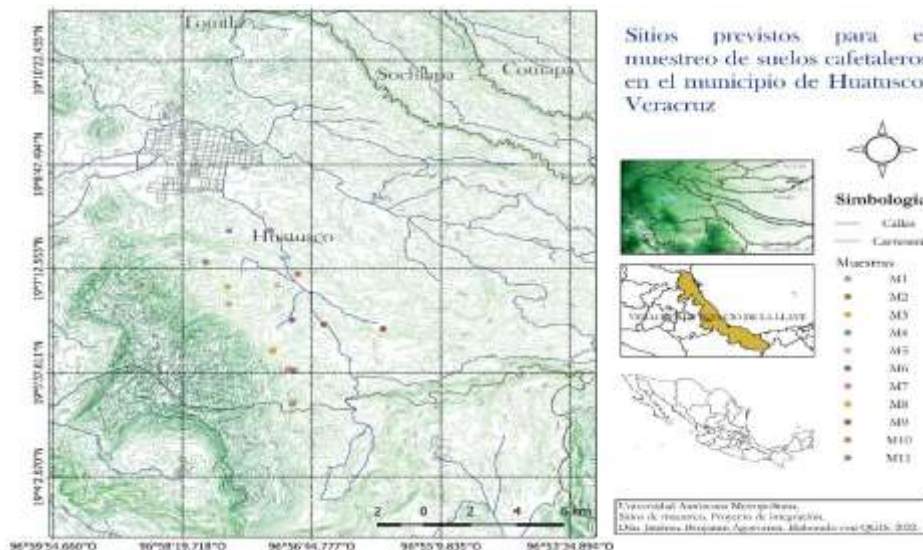


Figura 1. Mapa de los sitios del muestreo

Las muestras de suelo se recolectaron antes del trasplante de la planta y a 20 cm de profundidad, los sitios del muestreo se enumeraron con base a las diferentes localidades del municipio de Huatusco, Ver., y al sistema de cultivo empleado por los cafetaleros (Tabla 1)..Se obtuvieron 6 muestras simples y 5 compuestas considerando el tipo de agroecosistema y la distancia entre los sitios muestreados Las muestras se secaron a temperatura ambiente, posteriormente se tamizaron (malla Tyler No 40 (0.42 mm) para posteriores análisis.

TABLA 3. UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO.

Sitio de muestreo	Localidad	Coordenadas		Tipo de muestra	Muestra	Sistema de cultivo
		Latitud (N)	Longitud (O)			
101	Alta Luz	19°5'9"	96°56'59"	Compuesta	M1	Policultivo tecnificado
102	Alta Luz	19°5'10"	96°56'59"			
103	Alta Luz	19°5'11"	96°56'58"			
104	Manzana Dos	19°5'39"	96°56'58"	Compuesta	M2	Tradicional
105	Manzana Dos	19°5'40"	96°56'58"			
108	Manzana Dos	19°5'40"	96°56'59"			
109	Ixpila	19°6'41"	96°57'48"	Compuesta	M3	Tradicional
110	Ixpila	19°6'57"	96°58'49"			
111	Ixpila	19°6'57°	96°57'49"			
113	Ixpila	19°7'19"	96°58'5"	Simple	M4	Tecnificado
114	Cinco de Mayo	19°6'58"	96°57'11"	Simple	M5	Tecnificado
115	Michapa	19°6'26"	96°57'0.133"	Simple	M6	Tradicional
116	Manzana Dos	19°5'41"	96°57'2"	Simple	M7	Tradicional
117	Rincón Ramírez	19°5'58"	96°55'58"	Simple	M8	Tradicional
120	Michapa	19°6'22"	96°56'36"	Compuesta	M9	Policultivo tradicional
121	Novillero	19°6'18"	96°55'51"			
122	Cinco de Mayo	19°7'8"	96°56'56"	Simple	M10	Tradicional
123	La Cuchilla	19°7'47"	96°57'58"	Compuesta	M11	Tecnificado
124	La Cuchilla	19°7'47"	96°57'45"			

3.2. Determinación de pH

Para obtener el pH de los suelos, se siguió el método electrométrico AS-02 de la NOM-021-SEMARNAT-2000 [6].

3.3. Determinación de la materia orgánica

La determinación de la materia orgánica se realizó por triplicado, siguiendo la técnica AS-07, propuesta por la NOM-021-SEMARNAT-2000, la cual se conoce como el método de Walkley y Black.

3.3. Determinación de textura

La determinación de la textura del suelo se realizó mediante la técnica de Bouyoucos, establecida como el método AS-09 por la NOM-021-SEMARNAT-2000.

3.4. Cromatografía

La cromatografía de suelos se realizó siguiendo la metodología de Hernández [7]:

1. Se impregnaron círculos de papel filtro con solución AgNO_3 0.5% (5 g/L), utilizando un pabilo para que la solución subiera por capilaridad.

2. Se dejó secar el papel en la oscuridad durante un día a temperatura ambiente.
3. Se realizó una solución con 5 gramos de suelo y 50 ml de solución extractora NaOH 1% (10 g/L), en columnas de vidrio, se agitó y se dejó reposar por un día en la oscuridad.
4. Se tomó el líquido de la extracción de suelo evitando arrastrar el sedimento o partículas grandes, y se colocó en una caja Petri, donde se colocó el papel filtro impregnado con el pabilo para que se impregne la solución de suelo.
5. Se dejó reposar por un día en la oscuridad, y se interpretaron los cromatogramas de manera cualitativa.

3.5. Metales totales

La determinación de los metales se realizó mediante la espectrofotometría de absorción atómica de flama, para lo cual los suelos se sometieron a digestión ácida con ácido nítrico [8]:

1. Se pesó 1 gramo de suelo seco de cada muestra por duplicado, a cada una se le añadió una mezcla de 10 ml de agua destilada y 10 ml de ácido nítrico (HNO₃).
2. Se realizó lo mismo con dos blancos.
3. Para acelerar el proceso de reacción, se aplicó calor en una autoclave, durante 2 horas, llegando a una temperatura de 120°C y una presión de 15 psi.
4. El extracto se filtró en papel Whatman con poros de 11 µm, se aforó a 100 ml y se mantuvo en frascos de polietileno.
5. La digestión se analizó en el espectrofotómetro de absorción atómica de llama Thermo Electron Corporation SOLAAR.

3.6. Determinación de Fósforo

La determinación del fósforo biodisponible en suelos se realizó por triplicado, siguiendo el método AS-11, Bray y Kurtz 1, con un Espectrofotómetro UV-Visible.

3.7. Nitrógeno total

La determinación de nitrógeno se realizó mediante el método Kjeldahl, basados en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

4.Resultados y discusión

4.1. pH y materia orgánica

De acuerdo con Sadeghian, el rango adecuado de pH para los suelos es de 5 y 5.5 [9], en las muestras analizadas se determinó un pH promedio dentro de un intervalo de 4.7 a 5.09 (Figura 2), por lo que pH muy bajos o por encima de 6.5 dificultan la nutrición de los cafetales.

Con base en la materia orgánica (MO), esta es considerada, la fuente principal de nitrógeno, siendo el elemento más limitante en la producción de café; se tienen dos

categorías: suelos con contenidos bajos a medios ($MO < 8\%$) y suelos con contenidos medios a altos ($MO > 8\%$) ^[10], en las muestras de los suelos cafetaleros se clasificaron a 8 muestras con contenidos medios a altos (valores superiores a 8 %), con excepción de la muestra 4 que se encontró por debajo del 8% (4 %) (Figura 3).

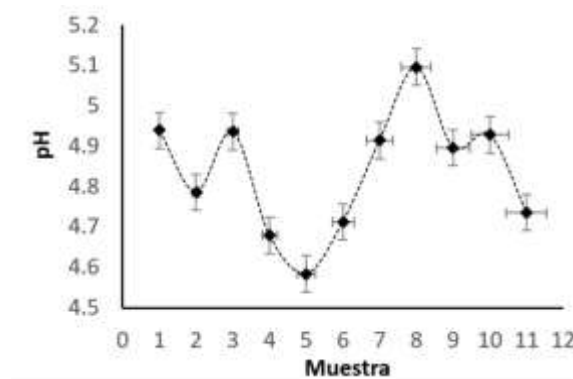


FIGURA 2. ACIDEZ DE LOS SUELOS

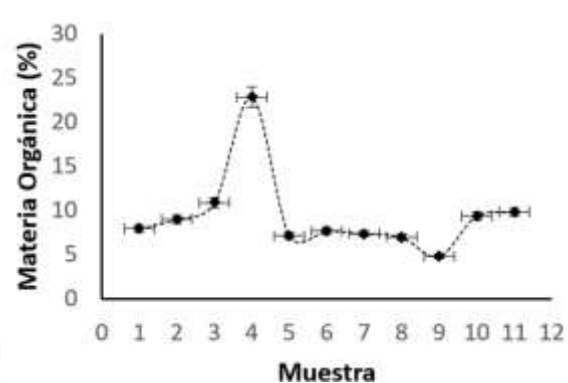


FIGURA 3. PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA

4.2. Textura y cromatografía de los suelos cafetaleros

La composición o textura en las diferentes muestras de estudio fueron de tipo franco-arenosa y de franco-arcillo-arenoso, lo que propicia un drenaje rápido del agua de lluvia (Tabla 4).

TABLA 4. TEXTURA DE LOS SUELOS ANALIZADOS

Muestra	Textura	Muestra	Textura
M1	Franco-arcilloso-arenoso	M7	Franco-arcilloso-arenoso
M2	Franco-arenoso	M8	Franco-arenoso
M3	Franco-arenoso	M9	Franco-arenoso
M4	Arenoso-franco	M10	Franco-arcilloso-arenoso
M5	Franco-arenoso	M11	Franco-arenoso
M6	Franco-arenoso		

Los cromatogramas obtenidos de las diferentes muestras de los suelos, mostraron en primer lugar, mayor porcentaje en la capa orgánica, la cual incluye a la materia orgánica en descomposición, como hojas caídas, restos de plantas y microorganismos en diferentes estados de descomposición, esta capa es fundamental para la formación de humus, ya que mejora la estructura del suelo y su capacidad para retener agua y nutrientes; en segundo lugar se encontró a la capa de actividad biológica, que contiene

organismos vivos como bacterias, hongos, lombrices y otros microorganismos que desempeñan un papel crucial en la descomposición de materia orgánica; se tiene una interacción entre el ciclo de nutrientes y la formación de estructura del suelo (Figura 4).

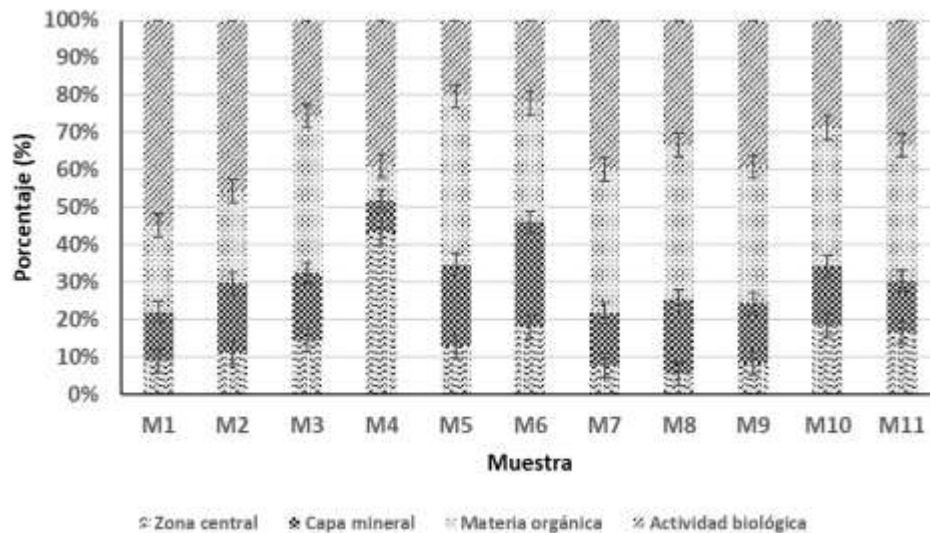


FIGURA 4. PORCENTAJES DE LA CROMATOGRAFÍA DE SUELOS.

4.3. Concentración de macronutrientes y micronutrientes

Potasio (K) y Cobre (Cu)

El potasio se presentó en mayor concentración en la muestra uno (1.3 g/Kg) y en menor concentración en las muestras dos y cuatro (0.5 g/Kg) (Figura 5), se considera que la concentración del elemento está por encima de los niveles requeridos por la planta de café ^[11].

El cobre presentó la mayor concentración en la muestra nueve (62 mg/Kg), mientras que la de menor concentración fue la cuatro (12.3 mg/Kg) (Figura 6), los suelos analizados se pueden clasificar como altos en cobre, por lo que no requieren de fertilización cúprica ^[12].

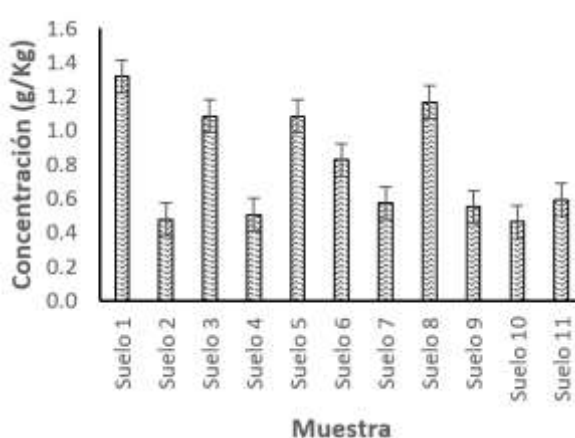


FIGURA 5. CONCENTRACIÓN DE K EN MUESTRAS

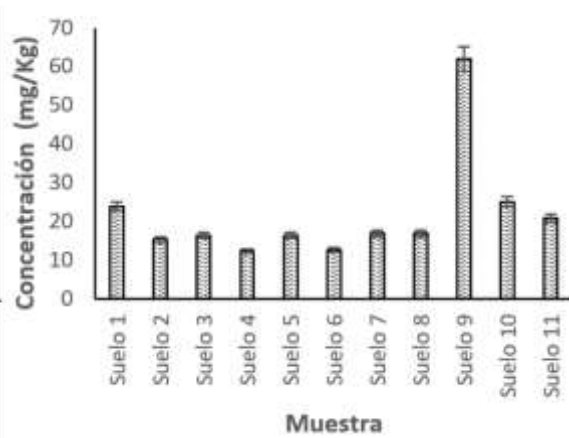


FIGURA 6. CONCENTRACIÓN DE CU EN MUESTRAS

Manganeso (Mn) y Hierro (Fe)

El manganeso presentó la mayor concentración en la muestra uno (2.4 g/Kg), y la menor en la cinco (0.1 g/Kg) (Figura 7), lo que mostró un exceso de este micronutriente en los suelos [10].

El hierro se presentó en mayor concentración en la muestra uno (30.2 g/Kg), y en menor concentración en la muestra cuatro (17.2 g/Kg) (Figura 8), por lo tanto, se recomienda que la fertilización no incluya al hierro, ya que todas las muestras presentaron concentraciones mayores a las necesarias para una nutrición adecuada para los cafetos [12].

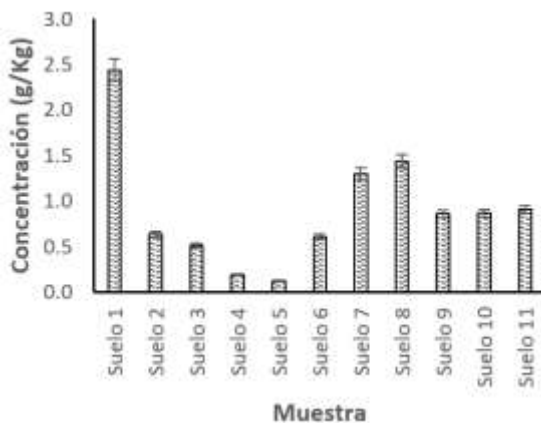


FIGURA 7. CONCENTRACIÓN DE MN EN MUESTRAS

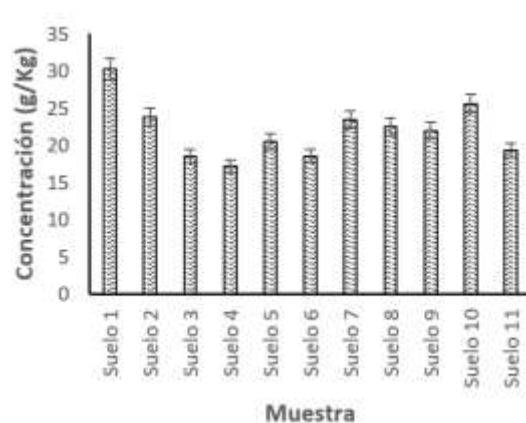


FIGURA 8. CONCENTRACIÓN DE FE EN MUESTRAS

Aluminio (Al) y Calcio (Ca)

El aluminio se presentó en mayor concentración en la muestra uno (28.3 g/Kg) y la menor en la muestra nueve (6.9 g/Kg) (Figura 9), se considera que no es necesaria la fertilización con aluminio, ya que todas las muestras están por encima del nivel recomendado ^[13].

La muestra con mayor concentración de Calcio fue la dos (226.8 g/Kg), mientras que la que contenía menor cantidad fue la tres (107.6 g/Kg) (Figura 10). Dichas concentraciones se encuentran arriba de la concentración recomendada en la literatura para los suelos cafetaleros, por lo que no se recomienda el uso de cal en la fertilización, además de que el pH de los suelos tiende a ser ácido, lo cual es ideal para la planta de café ^[10].

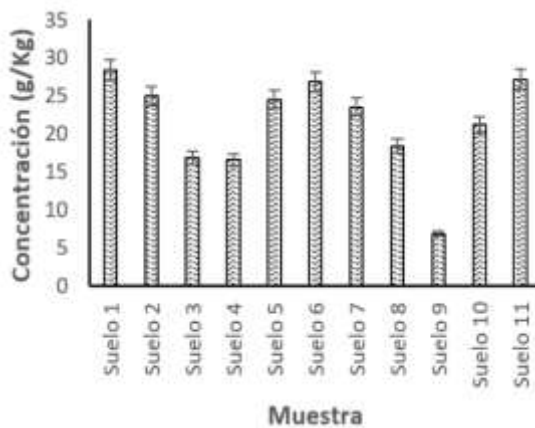


FIGURA 9. CONCENTRACIÓN DE AL EN MUESTRAS

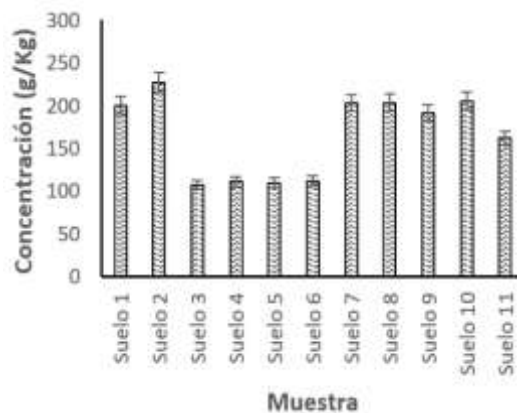


FIGURA 10. CONCENTRACIÓN DE CA EN MUESTRAS

Fósforo (P) y Nitrógeno (N)

El fósforo se presentó en mayor concentración en la muestra nueve (25.67 mg/Kg), y en menor en la muestra dos (8.95 mg/Kg) (Figura 11), para los suelos cafetaleros la cantidad requerida de fósforo se alcanza en los 30 mg por kilogramo de suelo; considerando los análisis obtenidos ninguna de las muestras de suelo se encuentra dentro esta concentración, por lo que es importante realizar la fertilización considerando la necesidad del elemento en los suelos cafetaleros ^[11].

La concentración de Nitrógeno total fue mayor en la muestra siete (0.4125%), mientras que la menor fue la muestra ocho (0.1068%) (Figura 12), se observó que todos los suelos se encuentran por debajo de las concentraciones requeridas ^[12].

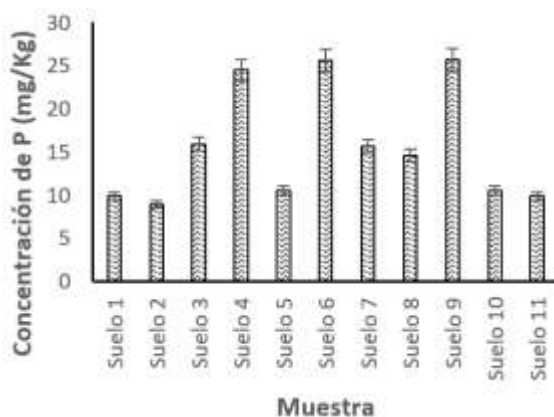


FIGURA 3. CONCENTRACIÓN DE P EN MUESTRAS

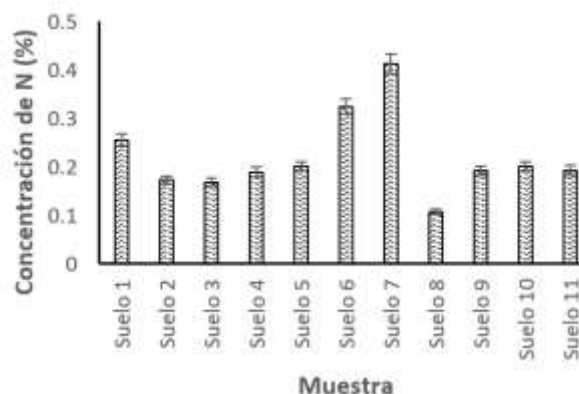


FIGURA 12. CONCENTRACIÓN DE N EN MUESTRAS

5.Conclusiones

La evaluación de macronutrientes y micronutrientes de los suelos cafetaleros de la región montañosa de Huatusco, en el estado de Veracruz, presentan resultados importantes donde se enfatiza un bajo aporte de nitrógeno (N) y fósforo (P), por lo que la fertilización en dichos suelos debe tomar en cuenta como factor principal nutrientes para la correcta nutrición de los cafetos.

Los fertilizantes que se utilicen deben de ser acordes a las necesidades en función de las plantaciones y cuidando que los suelos no se contaminen por excesos de algún elemento.

Se recomienda realizar la determinación de nitrógeno y fósforo en la pulpa de café, para ser utilizada como abono orgánico y mejorar las propiedades químicas del suelo, en los diferentes sistemas de producción (tecnificado, tradicional)

El análisis de los suelos para mejorar su fertilidad brinda resultados favorables para la producción vegetal, pero los costos de los análisis químicos no permiten la oportunidad a gran parte de los agricultores.

6.Bibliografía

1. Havlin, J.L; Beaton, J.D; Tisdale, S.L; Nelson, W.L. (1999). *Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management*. 6. Ed. Upper Saddle River, Prentice Hall. 499.
2. Navarro-García, G. y Navarro-Blaya S. (2003). *Química agrícola*, Mundi-Prensa, España, 2^{da} edición.
3. García S., Gallardo L., Nava T., Ruiz R., Escamilla P. (2007). *Factores que limitan la certificación del café orgánico en el esquema de comercio justo en cinco organizaciones de México*. Revista Mexicana del Caribe, No. 10.
4. Sadeghian K. (2008). *Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia*. CENICAFÉ. Colombia. Boletín técnico n. 32.

5. Sistema de Información Municipal. (2018). *Cuadernillos municipales. Huatusco*. Subsecretaría de Planeación.
6. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*.
7. Hernández R., Ochoa R., Ojeda B., Jiménez C., Sánchez R., Rodríguez R., Sánchez C. (2021). *Patrones para estimar la fertilidad del suelo mediante la técnica de cromatografía de Pfeiffer*. Rev. Terra Latinoamericana, vol. 39. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C.
8. Barceló Q., I. D., García A., J., Tiempo T., S. L., Solís C., H. E., Partida S., S., Cabal P., A. (2021). *Biodisponibilidad de metales pesados (Cr y Cu) en sedimentos del río Tlacoapa, en el municipio de Coscomatepec, Veracruz*. Rev. Tendencias en Docencia e Investigación en Química. México: Universidad Autónoma Metropolitana-Instituto Tecnológico Superior de Huatusco.
9. Sadeghian K. (2016). *La acidez del suelo; una limitante común para la producción de café*. Colombia. CENICAFE. Avances técnicos. No. 466.
10. López B., Castro M., Salinaz C., Reynoso S., López M. (2016). *Propiedades de los suelos cafetaleros en la Reserva de la Biósfera El Triunfo, Chiapas, México*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.7 Núm.3
11. Sadeghian K. (2009). *Calibración de análisis de suelo para N, P, K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra*. Colombia: Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafe 60.
12. Rosas A., Escamilla P. y Ruíz R. (2008). *Relación de los nutrimentos del suelo con las características físicas y sensoriales del café orgánico*. Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz, México. Rev. Terra Latinoamericana 26.
13. Huamaní Y., Huauya R. (2011). *Evaluación de la condición nutricional del suelo y foliar en cultivo de café orgánico en Tingo María – Perú*. Universidad Nacional Agraria de la Selva Rev. Investigación y Amazonia 2011.

Bagazo de caña de azúcar y cenizas de tolvas de hornos de bagazo industriales:
Caracterización del carbón activado producido con ambos materiales

Sugarcane bagasse and ash from industrial bagasse oven hoppers:
Characterization of activated carbon produced with both materials

Marisela Bernal-González^{*1}, María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa², Julio Alberto Solís-Fuentes³, Gustavo Valladares-Díaz⁴, Erick Ariel León-Chirino⁵

^{1,2,4,5}Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302, 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental,

Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, 04510 Ciudad de México

³Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas, Dr. Castelazo Ayala s/n, Industrial Ánimas, 91190 Xalapa de Enríquez, Veracruz, México

e-mail: gusvalldi@gmail.com, eleonchirino@gmail.com, jsolisjulio@gmail.com,
*marisela_bernal2000@yahoo.com.mx, mcduran@quimica.unam.mx

1 Resumen

Se hizo la caracterización de carbones activados, CA, producidos a partir de bagazo de caña y de cenizas de las tolvas de los hogares de las calderas de un ingenio azucarero cooperante, usando carbón activado comercial como referencia. Sus áreas superficiales fueron 1430, 391 y 69.5 m²/g para el carbón activado comercial, el de bagazo y el de cenizas de tolvas, respectivamente. Se probó su posible uso corroborando su capacidad para adsorber polifenoles presentes en muestras de vinazas tratadas anaerobiamente, ya que estos compuestos tienen posibles usos medicinales y comerciales. Se obtuvieron valores promedio de 87, 76 y 69%, respectivamente. Se determinó que el modelo cinético de adsorción para los tres carbones activados se asemeja al modelo de pseudo-segundo orden con un coeficiente de regresión de 0.9951 para el comercial y 0.9998 para los de bagazo y cenizas. Se planean más estudios para encontrar mejores condiciones de procesamiento para obtener mejores materiales de CA.

Palabras clave: Caracterización, carbón activado, adsorción de polifenoles

Abstract

The characterization of activated carbons produced from sugar cane bagasse and ashes from the hoppers of the boiler hearths of a cooperating sugar mill was carried out, using commercial activated carbon as a reference. Their surface areas were 1430, 391 and 69.5 m²/g for commercial activated carbon, bagasse and hopper ash, respectively. Its possible use was tested by corroborating its ability to adsorb polyphenols present in samples of anaerobically treated vinasse, since these compounds have possible medicinal and commercial uses. Average values of 87, 76, and 69% were obtained, respectively. It was determined that the adsorption kinetic model for the three activated carbons resembles the pseudo-second order model with a regression coefficient of 0.9951 for the commercial one and 0.9998 for the bagasse and ash one. Further studies are planned to find better processing conditions to obtain better AC materials

Keywords: Characterization, activated carbon, polyphenol adsorption

1.1 Introducción

Los materiales carbonosos muy porosos producidos a través de diversas formas de activación química o física se conocen como “carbón activado”. El carbón activado es el purificante más utilizado por el ser humano debido a sus propiedades adsorbentes. Dentro de sus usos está la purificación y potabilización del agua, la purificación y eliminación de compuestos olorosos del aire, la refinación de azúcar, la decoloración de aceites vegetales, entre otros. Este material posee un área superficial alta que permite atraer a diferentes moléculas que se encuentren ya sea fase gaseosa o en fase líquida (León-Chirino et al., 2024; Santiago-Romero, 2024).

En esta investigación se usó la activación química. Esta puede realizarse impregnando el material carbonoso con ácido fosfórico o con cloruro de zinc u otros compuestos y calentándolo a altas temperaturas (500-700°C, según Oña-Valdez, 2017). Los materiales que se usaron en este estudio fue el bagazo de caña y las cenizas provenientes de las tolvas de los hogares de las calderas para producir vapor de agua a través de la combustión de bagazo de un ingenio azucarero cooperante ya que se sabe que las propiedades del carbón activado dependen de la fuente de materia prima carbonosa utilizada (Guo et al., 2020; León-Chirino et al., 2024; Solís-Fuentes et al., 2012).

En la primera parte de esta investigación se estudiaron tres reactores termofílicos para degradar anaerobiamente (del griego con la alfa privativa y las palabras *aeros* y *bios*, vida sin aire) las vinazas de destilerías que producen alcohol etílico a partir de mieles de jugo de caña de azúcar, encontrando que cerca de un tercio de los sólidos disueltos en los efluentes líquidos de la primera torre de destilación no se eliminan. Se les considera genéricamente como compuestos fenólicos recalcitrantes al tratamiento anaerobio (ácido gálico, ácido tánico y melanoidinas) (Correa-López et al., 2023, 2024; Gaspar-Mendoza et al., 2022; León-Chirino et al., 2024). Esta investigación consideró el lapso de junio de 2023 a mayo de 2024

El objetivo de esta segunda parte de la investigación fue caracterizar los carbones activados producidos a partir de bagazo de caña y de cenizas de las tolvas de los hogares de un ingenio azucarero cooperante comparándolos con un control comercial usando difracción de rayos X, estructura microscópica y tamaño y volumen de poros, así como área superficial.

2. Condiciones experimentales

2.1 Materiales

Las cenizas de las tolvas y el bagazo de caña de un ingenio cooperante fueron traídos a los laboratorios donde se realizó la investigación (Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, LIQAYQA de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM). Se almacenaron en recipientes cerrados a temperatura ambiente. El

carbón activado comercial en polvo (CAC) marca Hycel, Lote: 23643I de 500 g, tiene diámetros de partícula de < 1 mm y de poro entre 15 y 25 Å con un área superficial de 452 m²/g (Contreras-Contreras, 2019). Las vinazas tratadas de reactores anaerobios de lecho de lodos de flujo ascendente termofílicos, descritos en la primera parte (León-Chirino et al., 2024), que fueron usadas para corroborar la bondad adsorbente de los materiales, se encontraban en refrigeración ($6\pm 2^{\circ}\text{C}$), por lo que se pre-calentaban en una parrilla Barnstead Thermoline hasta alcanzar la temperatura de alimentación de cada reactor (45, 55, 65°C). Se empleó una bomba peristáltica para dosificar las vinazas de cada reactor.

2.2 Proceso de activación química de las muestras de CAB (carbón activado de bagazo de caña) y CCT (carbón activado de cenizas de las tolvas)

El proceso de activación química fue el siguiente: Se pesaron 20 g de cada muestra en una balanza analítica marca Mettler Toledo modelo AG245 y se adicionaron 150 mL de ácido fosfórico (H₃PO₄) marca Meyer con 85% de pureza al 20%. El material impregnado se dejó 16 horas en contacto en un crisol de porcelana. Transcurrido el tiempo de activación, se carbonizó la muestra en mufla eléctrica (Industrias Sola Basic) Lindberg a 500°C durante una hora. El material carbonizado obtenido se dejó enfriar a temperatura ambiente y fue lavado varias veces con agua destilada caliente (70-80°C) y solución alcalina de NaOH 0.1 mol/L hasta ajustar su pH entre 6.5 y 7. Posteriormente, el carbón activado se colocó a 110°C en una estufa (Horno Gravity Convection) modelo Economy por un lapso de 48 horas para remover la humedad presente. Finalmente, se pulverizó en un mortero con pistilo y se almacenó en un frasco de plástico con tapa hermética hasta el día de su utilización.

2.3 Caracterización de los carbones activados CAB y CCT

Se caracterizaron usando las variables propuestas por Solís-Fuentes y colaboradores (2012): Difracción de rayos-X o *XRD* (*x-ray diffraction*), análisis morfológico y textural mediante microscopía electrónica de barrido o *SEM* (*Scanning Electron Microscope*) y adsorción-desorción de N a 77 K o *BET* (*Brunauer, Emmett y Teller superficial area*) (Tian y Wu, 2018), basada en la metodología clásica de Brunauer et al. (1938) y Emmett y Brunauer (1937). Se tomó en cuenta el valor de la humedad inicial.

2.4 Adsorción de polifenoles con carbón activado y su cinética

La adsorción en carbón activado se hizo continuando la metodología propuesta por Caqueret y colaboradores (2008, 2012) generosamente descrita por Contreras-Contreras (2019): El tiempo para que la concentración se mantuviera constante, según lo reportado por Caqueret (2006), fue de 180 minutos. Se usó 1 g de carbón activado con 50 mL de muestra de los efluentes de los reactores de 45, 55 y 65°C, respectivamente. Las muestras se mantuvieron bajo agitación mecánica a 150 rpm utilizando un equipo múltiple de calentamiento y agitación marca Barnstead Thermolyne. La

temperatura se mantuvo a 20°C. Después del tiempo de contacto de tres horas con el carbón activado, las muestras se filtraron en un filtro Whatman No. 1 y se centrifugaron a 3600 rpm para separar la fase sólida de la fase líquida. Siguiendo el método de Folin-Ciocalteu (Contreras-Contreras, 2019) se cuantificaron los polifenoles por triplicado. Las mediciones se realizaron en un espectrofotómetro Rayleigh UV-1800 usando una longitud de onda de 765 nm. Para la cinética de adsorción se tomaron los modelos de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y difusión intrapartícula. Para obtener los datos experimentales se obtuvo la curva patrón con 1 g de carbón activado en 50 mL de ácido gálico marca SIGMA-ALDRICH, 98% de pureza, con una concentración de 2 g/L, tomando lectura de las muestras a los 2, 5, 10, 20 y 40 minutos.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de los carbones activados

Los resultados de la caracterización mediante *BET* de todos los tipos de carbón activado producidos, CAB y CCT y el control comercial CAC, se muestra en la Tabla 1, así como sus valores de humedad. Estos se identificaron en cuanto a la humedad, la estructura de los carbones activados mediante difracción de rayos-X, microscopía electrónica de barrido y adsorción-desorción de N a 77 K.

Tabla 1. Resultados de análisis *BET* en el CAC, CAB y CCT

Material carbonoso	Área superficial (m ² /g)	Tamaño de poro (Å)	Volumen de poro (cm ³ /g)	Área de microporos (m ² /g)	Humedad (%)	Referencia
Carbón activado comercial CAC	1430	32.03	1.15	686.2	0.26	-
Carbón activado de bagazo de caña CAB	391.2	57.58	0.56	59.6	0.33	-
Carbón activado de cenizas de las tolvas CCT	69.46	44.51	0.08	43.4	0.22	-
Bagazo de caña activado (carbonizado en atmósfera de nitrógeno)	368.7	-	-	278.3	3.6	Colpas et al. (2017)
Bagazo de caña activado (carbonizado en atmósfera de nitrógeno y oxidado con ácido nítrico)	459.3	-	-	401.7	3.6	Colpas et al. (2017)
Bagazo de caña activado con (H ₃ PO ₄ 1.8 M)	914	36	0.5	-	-	Del-Angel et al. (2022)

Carbón activado con 30% masa de H₃PO₄ activado en un flujo de N₂	873	48.3	1.06	-	-	Guo et al. (2020)
Carbón activado con 30% masa de NaOH activado en un flujo de N₂	1149	60.2	1.73	-	-	Guo et al. (2020)
Bagazo de caña activado (carbonizado en atmósfera de nitrógeno)	368.7	-	-	278.3	3.6	Primera-Pedrozo et al. (2011)
Bagazo de caña activado(carbonizado en atmósfera de nitrógeno y oxidado con peróxido de hidrógeno)	539.2	-	-	446.4	4.4	Primera-Pedrozo et al. (2011)
Carbón activado (forma física) de caña de Bambú	980	-	0.45	-	8.5	Varriano et al. (2015)

Comparando esta información con la que se encontró en la revisión bibliográfica empleando condiciones similares a las usadas para esta investigación utilizando bagazo de caña como materia prima y caña de bambú en un caso a modo de comparación, se encontró que, el área superficial del carbón activado de bagazo producido en nuestros laboratorios cuenta con un valor muy similar al encontrado, ya cuando se compara con el realizado con un tratamiento adicional sí es inferior al que fue activado con H₃PO₄ 1.8M. Evaluando estos carbones, CAB y CCT, comparados con los resultados dados por Guo et al. (2020) son definitivamente inferiores. Esto puede deberse a su activación en presencia de un flujo de N₂ puro. En cuanto al área de microporos sí existe una notable diferencia, pudiendo esto deberse a las diferencias en el proceso de activación como la carbonización en atmósfera o atmósfera de nitrógeno y la oxidación ya sea con ácido nítrico o peróxido de hidrógeno. En cuanto a la humedad el producido aquí en los laboratorios tiene valores inferiores. El volumen de poros posee valores muy similares comparados con los encontrados en la literatura, mientras que el tamaño de poros tiende a presentar valores mayores, pudiendo ser debidos a la diferencia en las condiciones de activación. El carbón activado de cenizas de las tolvas se encuentra muy por debajo en todos los aspectos, por lo que no es muy factible su utilización, ya que se debe emplear una mayor cantidad para lograr una efectividad similar.

En las Figuras 1 a la 3 se presentan las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido a 10, 5 y 1 μm .

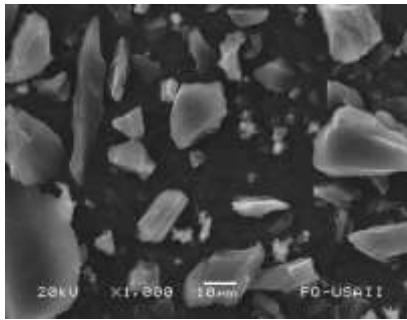


Figura 1a. CAC (SEM)

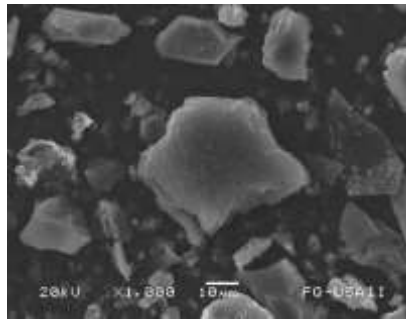


Figura 1b. CAB (SEM)

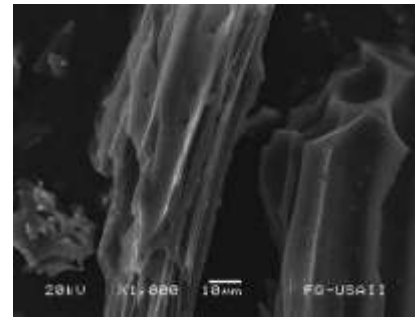


Figura 1c. CCT (SEM)

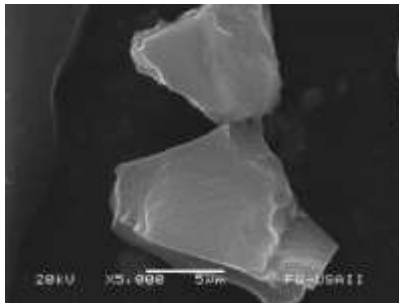


Figura 2a. CAC (SEM)

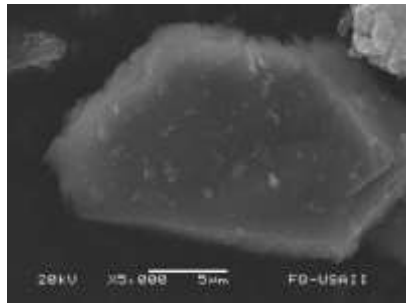


Figura 2b. CAB (SEM)

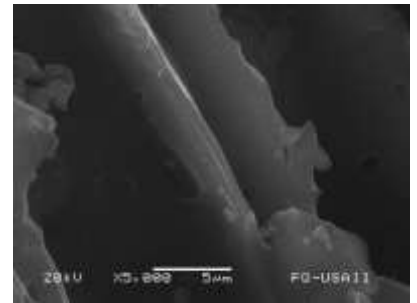


Figura 2c. CCT (SEM)

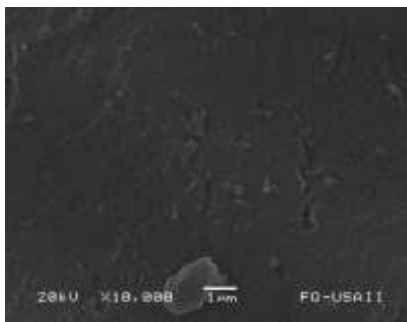


Figura 3a. CAC (SEM)

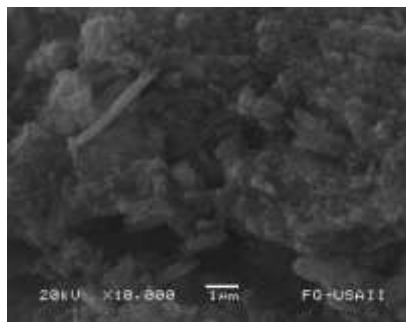


Figura 3b. CAB (SEM)

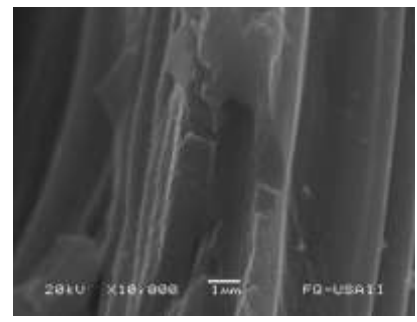
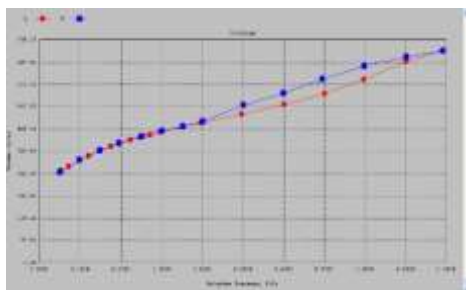


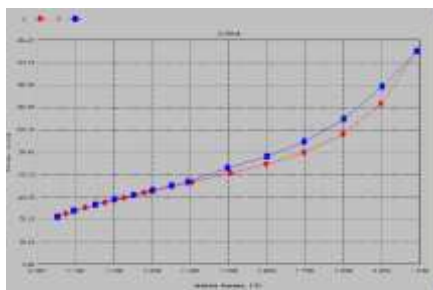
Figura 3c. CCT (SEM)

En las imágenes se pueden observar algunos de los poros presentes en el carbón, los cuales son el resultado del proceso de activación, así como las diferencias visuales en cuanto a su tamaño, forma y estructura viendo que la activación del carbón se llevó a cabo correctamente, de acuerdo con los parámetros utilizados. Se puede corroborar los resultados obtenidos mediante el análisis de BET donde el CAC (carbón activado comercial) presenta una mayor área superficial, así como un mayor número de poros y de menor tamaño y el CCT (carbón activado de tolvas) presentando las características más desfavorables con una menor área y una considerablemente menor cantidad de poros como se ve claramente en la Tabla 1. Los resultados son semejantes a los reportados por Jaén-Jiménez y Zamora-Umaña (2024) y Guo (2020), con bagazo de caña de igual forma como precursor. En cuanto al CAB se observa que este posee estructuras de poros bastante desarrolladas, esta

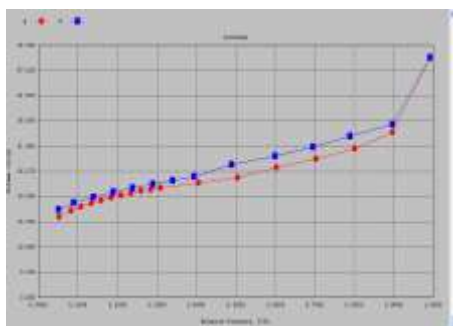
activación con H_3PO_4 produce grupos funcionales con presencia de oxígeno en el precursor, lo cual inhibe la formación de alquitrán, mientras que la volatilización del fósforo a temperaturas altas llevará a la producción de vapor de agua facilitando la formación de poros (Guo et al., 2020). Las Figuras 4a, b y c muestran las isothermas de adsorción (rojo) y desorción (azul) de nitrógeno basadas en las recomendaciones de la *Internacional Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)*, Unión Internacional de Química Pura y Aplicada. Las isothermas encontradas son más semejantes a la del tipo IV de la *IUPAC*, la cual es característica de sólidos mesoporosos. Presentan un incremento de la cantidad adsorbida importante a presiones relativas intermedias y ocurre mediante un mecanismo de llenado en multicapas (Sing et al., 2014).



(a) CAC



(b) CAB



(c) CCT

Figura 4. Isothermas de adsorción-desorción con N_2 (BET), (a) CAC, (b) CAB y (c) CCT

3.2 Pruebas de efectividad de adsorción de los carbones activados

Con el objetivo de corroborar su efectividad de adsorción se probaron con los efluentes de los tres reactores donde se trataron anaerobiamente las vinazas para determinar su capacidad para retener los polifenoles presentes en ellas. Con los datos de la eficiencia de remoción de polifenoles en el tratamiento anaerobio en los tres reactores pudo observarse que menos del 10% es degradado en ellos (León-Chirino et al., 2024) corroborando lo publicado en la literatura (Correa-López, 2022; Martínez-Arellano, 2022). Los promedios de adsorción de esos polifenoles remanentes en las vinazas tratadas anaerobiamente con los dos carbones activados en estudio, CAB y CCT y el control CAC, de las muestras por triplicado se presentan en la Tabla 2. Se puede observar que, al poner en contacto

las muestras con el carbón activado comercial se presenta una adsorción promedio de 87% (considerando que la diferencia de temperatura de operación de los tres reactores no afectaría esta adsorción a 20°C) de los polifenoles presentes, con el carbón activado de bagazo de caña de un 76% y, con el carbón activado de cenizas, con un gramo se tenía una absorción pobre por lo que se duplicó la cantidad (dos gramos) dando 69%. Esto indica que es necesario optimizar las condiciones de activación de los carbones activados en estudio para tener una mejor capacidad de adsorción.

Tabla 2. Cuantificación de polifenoles, PF, en las corrientes de vinazas sin tratar y tratadas
(mg ácido gálico/L)

Clave	I Sin tratam. anaer. entrada	I Sin tratam. anaer. salida	Eficiencia (%)	E Con tratam. anaer. Entrada	E Con tratam. anaer. salida	Eficiencia (%)
CAC						
R 45	1808 (± 115)	365 (±63)	80	1651 (±140)	277 (±76)	84
R 55	1524 (± 297)	206 (±49)	87	1392 (± 232)	203 (±12)	86
R 65	876 (±155)	66 (±6)	92.5	802 (±138)	54 (±9)	93.3
CAB						
R 45	1808 (± 115)	605 (±10)	66	1651 (±140)	443 (±98)	74
R 55	1524 (± 297)	356 (±47)	77	1392 (± 232)	388 (±33)	73
R 65	876 (±155)	134 (±38)	85	802 (±138)	92 (±2)	89
CCT						
R 45	1808 (± 115)	838 (±33)	54	1651 (±140)	590 (±10)	65
R 55	1524 (± 297)	542 (±21)	65	1392 (± 232)	451 (±35)	68
R 65	876 (±155)	120 (±9)	87	802 (±138)	178 (±18)	78

I: Influyente; E: Efluente; I 45: Influyente del RALLFA (R) a 45°C; E 45: Efluente del RALLFA a 45°C; I 55: Influyente del RALLFA a 55°C; E 55: Efluente del RALLFA a 55°C; I 65: Influyente del RALLFA a 65°C; E 65: Efluente del RALLFA a 65°C; Números en paréntesis: Desviaciones estándar de valores por triplicado

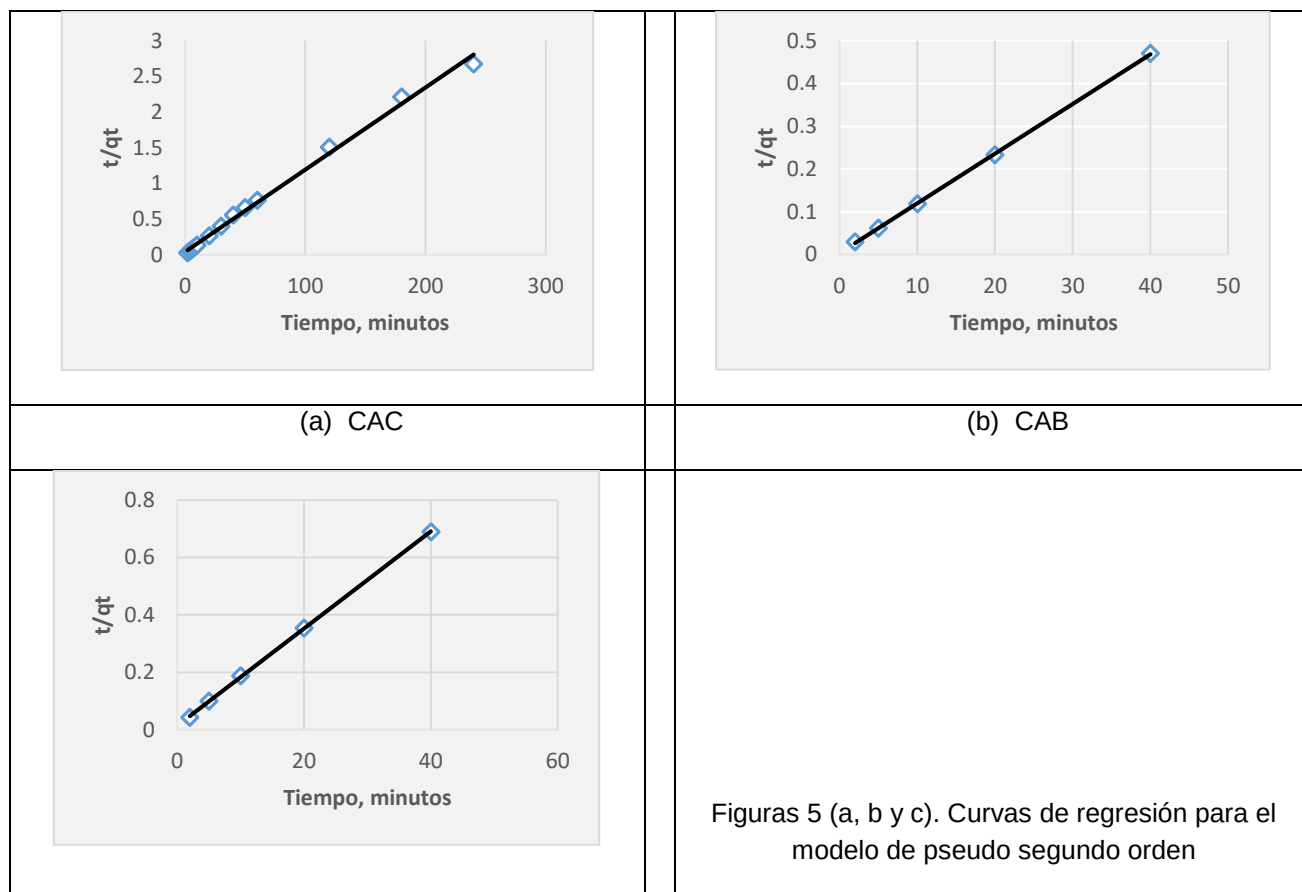
4. Cinética de adsorción

Para evaluar la efectividad con la que los polifenoles se adsorbieron tanto en el CAC, como en el CAB y el CCT se evaluaron tres modelos cinéticos: Pseudo primer orden (PPO), Pseudo segundo orden (PSO) y Difusión intrapartícula (DI). Los resultados se muestran en la Tabla 3 para los modelos considerados y en las Figuras 5a, b y c las curvas de regresión solamente para el modelo PSO, que fue el que mejor explicó los valores experimentales. La Tabla 3 muestra los valores de R^2 y los estimados de los parámetros cinéticos de los tres modelos analizados. En este caso el modelo de

Pseudo segundo orden mostró los mayores valores del coeficiente de correlación con respecto de los otros dos modelos ensayados para los tres adsorbentes. Los valores estimados de q_e y K_2 fueron de 86.2, 86.95 y 59.17 mg/g y de 260.06, 327.36 y 48.31 mg/g min, para los adsorbentes CAB, CAC y CCT, respectivamente. Es importante señalar que el modelo lineal de PSO tipo 1 utilizado, según lo señalado por Hai Nguyen Tran (2023) no permite identificar posibles errores experimentales durante la etapa cinética, previa a la de equilibrio, durante el proceso de adsorción y que, no obstante los altos valores de R^2 , los valores estimados pueden contener importantes discrepancias con respecto de los valores reales. Esto supone que la molécula adsorbida se sitúa en los lugares activos del adsorbente y que la capacidad de adsorción es proporcional al número de sitios activos ocupados en el equilibrio cuyo mecanismo de remoción es la quimisorción como paso dominante en el sistema, lo que significa que las fuerzas de atracción entre el adsorbido y el adsorbente son principalmente de carácter químico, por lo que el proceso de desorción no es tan favorable (Zhao et al., 2017). Esta sería otra línea a seguir en esta investigación.

Tabla 3. Ecuaciones de regresión de los modelos ajustados de Pseudo primer orden, Pseudo segundo orden y de difusión intrapartícula para los adsorbentes CAB, CAC y CCT

Modelo/Adsorbente		CAB	CAC	CCT
Pseudo primer orden	Ecuación de regresión	$y = -0.0454 x + 3.2152$	$y = -0.0084 x + 3.1459$	$y = -0.0154 x + 3.9951$
$\ln (q_e - q_i) = \ln q_e - k_1 t$	R^2	0.4216	0.5983	0.3964
	K_1, min^{-1}	-0.0454	-0.0084	-0.0154
	$q_e, \text{mg/g}$	24.90	23.24	54.33
Pseudo segundo orden	Ecuación de regresión	$y = 0.0116 x + 0.0035$	$y = 0.0115 x + 0.0433$	$y = 0.0169 x + 0.0138$
$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$	R^2	0.9998	0.9951	0.9998
	$K_2, \text{mg/g min}$	260.06	327.36	48.31
	$q_e, \text{mg/g}$	86.2	86.95	59.17
Difusión intrapartícula	Ecuación de regresión	$y = 11.07 x + 34.849$	$y = 2.3569x + 57.735$	$y = 7.4623 x + 22.325$
$q_t = K_{id} \cdot t^{0.5} + c$	R^2	0.5463	0.2695	0.581
	$K_{id}, \text{mg/g min}^{1/2}$	11.07	2.3569	7.4623
	$C, \text{mg/g}$	34.849	57.735	22.325



4.1 Discusión final

Se caracterizaron los carbones activados producidos con las condiciones dadas por Contreras-Contreras (2019) a partir de bagazo de caña y de ceniza de las tolvas provenientes de un ingenio cooperante, así como del carbón activado comercial empleado como referencia. Se obtuvieron áreas superficiales, así como volúmenes de poro y microporo, menores para los dos carbones en estudio respecto de los valores obtenidos con el carbón activado de origen comercial: 391.2 m²/g, 0.56 cm³/g y 69.46 m²/g, 0.08 cm³/g para el carbón activado de bagazo y el de cenizas de las tolvas, respectivamente *versus* 1430 m²/g, 1.15 cm³/g para el carbón activado comercial (Tabla 4). En la literatura se encontró que el área superficial del carbón activado de bagazo producido en esta investigación es muy similar al encontrado por Colpas et al. (2017) y Primera-Pedrozo et al. (2011). Cuando se compara con el reportado por Del-Angel y colaboradores (202) y Guo et al. (2020), que incluyó un tratamiento adicional durante la activación con un flujo de N₂ puro, el área superficial es inferior. El volumen de poros cuenta con valores similares a los reportados por Del Angel (2022) y Varriano (2015) sin embargo, respecto al reportado por Guo (2020) es inferior, pudiendo deberse a la activación en presencia de N₂ puro. En cuanto al área de microporos hubo mayores discrepancias, que pueden atribuirse a las diferencias en el proceso de activación, cuando la carbonización se realiza en atmosfera de nitrógeno y la oxidación se efectúa ya sea con ácido nítrico o con peróxido de hidrógeno. El volumen de poro de los adsorbentes preparados en este trabajo, mostró valores

similares a los reportados por Del-Angel et al. (2022) y Varriano et al. (2015), mientras que el tamaño de poros tiende a presentar valores similares en cuanto al carbón activado de bagazo producido por Guo et al. (2020) y ligeramente superiores a los demás reportados. Estos contrastes pueden ser debidos también a las diferencias en el proceso de activación.

Tabla 4. Datos de los carbones activados en el laboratorio (CAC, CAB y CCT)

Característica	CAC	CAB	CCT
Tamaño de poros, Å	32.03	57.58	44.51
Área superficial, m ² /g	1430	391.2	69.46
Área de microporos, m ² /g	686.2	59.6	43.4
Volumen microporos, cm ³ /g	0.33	0.026	0.022
Humedad, %	0.26	0.33	0.22

Acorde con lo anterior, la siguiente etapa de esta investigación debe contemplar un diseño experimental que permita comparar una carbonización en atmósfera normal y atmósfera de nitrógeno ya sea combinado con una oxidación con ácido nítrico o peróxido de hidrógeno y variando el % de H₃PO₄ empleado en la activación química para mejorar sus características, principalmente su área de microporos. El contenido de polifenoles, tanto de los influentes como de los efluentes de los reactores es muy similar por lo que quedó demostrado que los microorganismos dentro de los mismos no utilizan o utilizan una proporción muy baja de estos compuestos como sustrato para su alimentación. Esto ha sido estudiado desde hace décadas como quedó demostrado en las revisiones bibliográficas de Correa-López (2022) y Martínez-Arellano (2022).

5. Conclusiones

Se demostró que el carbón activado de bagazo de caña obtenido siguiendo las condiciones establecidas por Contreras-Contreras (2019) es más efectivo que el de cenizas de las tolvas ya que este último es un residuo que no se obtiene en condiciones controladas pero que es posible mejorar su desempeño al modificar las condiciones de la adsorción (por ejemplo, aumentando la cantidad de CCT). Y, además, su desempeño no fue tan diferente al carbón activado comercial a pesar de tener características de área superficial, tamaño de poro, etc., muy diferentes. Esta sería una área de oportunidad para estudiar con más profundidad los fenómenos de transferencia de masa que están ocurriendo entre los polifenoles y el material adsorbente (Thakur et al., 2013). Finalmente, la cinética

de adsorción se asemeja en los tres casos con el modelo de pseudo segundo orden con un coeficiente de regresión de 0.9951 para el comercial y 0.9998 para los de bagazo y cenizas.

Reconocimientos

Los(as) autores(as) agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías de México (Conahcyt) la beca otorgada al último autor para realizar sus estudios de posgrado. También dan un reconocimiento especial al Dr. Rodolfo Zanella y sus colaboradores del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM por su valioso apoyo para caracterizar los tres materiales. Asimismo, reconocen el valioso apoyo del Ing. Manuel Enríquez-Poy para la realización de esta investigación, tanto por el aprovisionamiento de vinazas como del bagazo y del carbón de tolvas. Finalmente, agradecen el apoyo del personal de los Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental del Departamento de Ingeniería Química, especialmente del M. en C. Rolando García-Gómez, Coordinador del Laboratorio 301, del laboratorista el Sr. Benjamín Ramírez y de los auxiliares de laboratorio, los Sres. Espiridión Vargas e Ismael Cruz y al personal de la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y la Industria, USAII, de la Facultad de Química de la UNAM por los análisis de los tres materiales.

6 Referencias

- Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*. 60(2):309-319.
- Caqueret, V. 2006. Conception d'un procédé multi-étapes d'obtention de la bétaine à partir de la filière bioéthanol. Doctoral dissertation. Orléans, Francia. Abstract. Obtenido de: www.theses.fr/2006ORLE2027
- Caqueret, V., Bostyn, S., Cagnon, B., Fauduet, H. 2008. Purification of sugar beet vinasse-adsorption of polyphenolic and dark colored compounds on different commercial activated carbons. *Bioresource Technology*. 99(13):5814-5821.
- Caqueret, V., Cagnon, B., Bostyn, S., Fauduet, H. 2012. Removal of dark coloured and polyphenolic compounds of sugar beet vinasse by adsorption onto activated carbons: Application to a crosscurrent adsorption process. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 90(2):403-411.
- Colpas, F.; Tarón, A.; González, R. 2017. Área superficial de carbones activados y modificados obtenidos del recurso agrícola *Saccharum officinarum*. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 34(2): 62-72. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173402.72>.
- Contreras-Contreras, J.A. 2019. Caracterización química de vinazas de torres de destilación y posible remoción de polifenoles de ellas empleando sistemas bioquímicos anaerobios. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas. Defensa: Enero 25, 2019. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2019/enero/0784401/Index.html>
- Correa-López, R.E. 2022. Métodos de tratamiento alternos tanto biológicos como fisicoquímicos, para el reaprovechamiento de vinazas provenientes de una planta cooperante productora de bioetanol. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. Defensa: Junio 30, 2022. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2022/marzo/0823752/Index.html>

Correa-López, R.E., Gaspar-Mendoza, L., Pérez-Barrera, S., Bernal-González, M., Solís-Fuentes, J.A., Navarro-Frómata, A.E., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2024. Aprovechamiento integral de las vinazas de alcohol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) mediante anaerobiosis y la posible separación de polifenoles útiles usando carbón activado de bagazo de caña. Segunda parte: Bases teóricas para su factibilidad técnica y económica / *Comprehensive use of sugarcane (Saccharum officinarum) alcohol stillage through anaerobiosis and the possible separation of useful polyphenols using activated carbon from cane bagasse. Second part: Theoretical bases for its technical and economic feasibility*. Revista Mix-Tec. 4(6): 89-119. <https://mixtec.utim.edu.mx/articulosv6/articulo07.pdf>

Correa-López, R.E., Gaspar-Mendoza, L., Pérez-Barrera, S., Martínez-Arellano, D., Bernal-González, M., Solís-Fuentes, J.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2023. Valorización de vinazas sometidas a un tratamiento anaerobio termofílico, propuestas de mejora, un estudio de caso exitoso. Revista ATAM. 36(3):6-11,13-15. ISSN 2007-610X.

Colpas, F., Tarón, A., González, R. 2017. Área superficial de carbones activados y modificados obtenidos del recurso agrícola *Saccharum officinarum*. Revista de Ciencias Agrícolas. 34(2): 62-72. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173402.72>.

1. Del-Angel, E., Pantoja, M.A., López, R., Cruz, A.E. 2022. Treatment of domestic wastewater using activated carbon prepared from sugarcane bagasse. Tecnología y Ciencias del Agua. 13(1): 144-183. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-04>
2. Emmett, P.H., Brunauer, S. 1937. The use of low temperature van der Waals adsorption isotherms in determining the surface area of iron synthetic ammonia catalysts. Journal of the American Chemical Society. 59(8): 1553-1564.
3. Gaspar-Mendoza, L. 2022. Adsorción y desorción de polifenoles para su uso medicinal a partir de vinazas de bioetanol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) usando carbón activado del propio bagazo de la caña. Tesis de Licenciatura de Ingeniera Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. Defensa: Noviembre 18, 2022. Ciudad de México, México. <http://132.248.9.195/ptd2022/septiembre/0830323/Index.html>
4. Gaspar-Mendoza, L., Bernal-González, M., García-Gómez, R.S., Solís-Fuentes, J.A., Navarro-Frómata, A.E., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2022. Aprovechamiento integral de las vinazas de alcohol de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) mediante anaerobiosis y la posible separación de polifenoles útiles usando carbón activado de bagazo de caña / *Comprehensive use of sugarcane (Saccharum officinarum) alcohol stillage through anaerobiosis and the possible separation of useful polyphenols using activated carbon from cane bagasse*. Revista Mix-Tec. 2(3):12-54. <http://mixtec.utim.edu.mx/articulosv3/articulo02.pdf>
5. Guo, Y., Tan, C., Sun, J., Li, W., Zhang, L., Zhao, C. 2020. Porous activated carbons derived from waste sugarcane bagasse for CO₂ adsorption. Chemical Engineering Journal. 381: 122736.
6. Jaén-Jiménez, J.C., Zamora-Umaña, G.J. 2024. Obtención de carbón activado a partir del bagazo de caña, para su uso en la remoción de los fármacos diclofenaco y amoxicilina en aguas residuales. Revista Ciencia y Salud Integrando Conocimientos. 8. 53-66. Doi: 10.34192/cienciaysalud.v8i2.766.
7. León-Chirino, E.A., Valladares-Díaz, G., Solís-Fuentes, J.A., Bernal-González, M., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. 2024. Carbón activado de cenizas de tolvas y de bagazo para la recuperación de los polifenoles presentes en vinazas tratadas anaerobiamente / *Activated carbon from hopper ashes and bagasse for the recovery of polyphenols present in anaerobically treated*

- vinasse. Presentado en XLIII Convención y EXPOATAM 2024. Asociación de Técnicos Azucareros de México, A. C. Septiembre 18, 19 y 20. WTC, Boca del Río, Veracruz, México.
8. Martínez-Arellano, D. 2022. Recuperación de polifenoles de vinazas sometidas a un tratamiento anaerobio en reactores de lecho de lodos de flujo ascendente (RALLFA) termofílicos. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química. Defensa: Noviembre 25, 2022. Ciudad de México, México.
<http://132.248.9.195/ptd2022/noviembre/0833219/Index.html>
 9. Primera-Pedrozo, O., Colpas-Castillo, F., Meza-Fuentes, E., Fernández-Maestre, R. 2011. Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exact. Fis. Nat. (Bogotá). 35(136): 387-396: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082011000300012
 10. Santiago-Romero, A. 2024. Uso de las cenizas de bagazo de caña como fuente de carbón activado. Tesis de maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
 11. Sing, K.S.W., Rouquerol, F., Rouquerol, J. 2014. Classical interpretation of physisorption isotherms at the gas-solid interface. In *Adsorption by Powders and Porous Solids (Second Edition)*. Rouquerol, F., Rouquerol, J., Sing, K.S.W., Llewellyn, P., Maurin, G., Eds. Academic Press. Pp. 159-189. Oxford, Reino Unido.
 12. Solís-Fuentes, J.A., Morales-Téllez, M., Ayala-Tirado, R.C., Durán-de-Bazúa, M.d.C. 2012. Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. Tecnología, Ciencia, Educación (IMIQ, México). 27(1): 36-48. ISSN: 0186-6036
 13. Thakur, P.K., Mathur, A.K., Gautam, S.B., Balomajumder, C., Rahul. 2013. Determination of mass transfer coefficients for a mixture of compost, sugarcane bagasse, and granulated activated carbon as packing medium in biofilter. Bioremediation Journal. 170: 61-70.
 14. Tian, Y., Wu, J. 2018. A comprehensive analysis on the BET area for nanoporous materials. AIChE Journal. 64(1):286-293. <https://doi.org/10.1002/aic.15880>
 15. Tran, H.N. 2023. Applying linear forms of pseudo-second-order kinetic model for feasibly identifying errors in the initial periods of time-dependent adsorption datasets. Water. 15(6): 1231. <https://doi.org/10.3390/w15061231>
 16. Varriano, N., Gil, M., Cozzarín, R., Pereyra, A., Balasini, J., Alberino, J., García-Enríquez, S., Pucacco, S. 2015. Producción sustentable de carbón activado a partir de caña de bambú. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata. https://www.edutecne.utn.edu.ar/coini_2013/trabajos/COE01_TC.pdf
<https://www.researchgate.net/publication/283712191>
 17. Zhao, Y, Li, W, Liu, J, Huang, K., Wu, C., Shao, H, Chen, H, 2017. Modification of garlic peel by nitric acid and its application as a novel adsorbent for solid-phase extraction of quinolone antibiotics. Chemical Engineering Journal. 326: 745-755.

Movilidad y disolución de nanopartículas en columnas de suelo rizosférico inalterado de nogal

Luna Velasco, M.A.,¹ Estrada Acosta, D.A.,¹ Condori Chambi, C.D.,¹ Tarango Rivero, S.,² Salas Leiva J.S.,³

¹Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Chihuahua, Chih., México.

²Campo experimental Delicias, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Delicias, Chih., México.

³CONAHCyT-CIMAV, Chihuahua, Chih., México

antonio.luna@cimav.edu.mx; david.estrada@cimav.edu.mx;
cesar.condori@cimav.edu.mx; joan.salas@cimav.edu.mx

1. Resumen

El suelo se considera el principal receptor de nanopartículas (NP), motivo crucial para evaluar su comportamiento en ese ecosistema y predecir sus efectos. Este trabajo evaluó la movilidad y disolución de NP CuO y ZnO en columnas de suelo rizosférico inalterado de nogal, de tipo franco-arcilloso. La movilidad de ambas NP fue muy baja, asociado a las interacciones de cargas que se favorecen entre las NP y componentes del suelo (ej. arena y materia orgánica). Las NP ZnO se movilizaron y solubilizaron un poco más que las NP CuO, relacionado a su mayor estabilidad y menor tamaño hidrodinámico. Los resultados sugieren el potencial de las NP ZnO y CuO para proveer Cu y Zn en cultivos de suelos similares, con deficiencia de esos elementos; como alternativa más sustentable a las convencionales, dado que su alta retención y lenta solubilización, limitaría la infiltración y favorecería su aprovechamiento por los cultivos.

Palabras clave: Transporte de nanopartículas, matriz porosa, suelo, disolución.

2. Introducción

La producción y aplicación de nanomateriales (NMs) en diversos sectores productivos ha crecido significativamente durante las últimas 3 décadas. Por ejemplo, las nanopartículas (NP) de CuO y ZnO se han empleado como agentes antimicrobianos en productos textiles, pinturas, productos cosméticos, entre otros [1,2]. Ambos tipos de NP también han mostrado potencial para proveer elementos traza como Zn y Cu en cultivos agrícolas [3,4,5].

A la par del aporte de los distintos NMs en soluciones innovadoras en varias ramas de la industria, también aumenta la posibilidad de liberarlos intencional o no intencional al ambiente, siendo el suelo uno de los mayores receptores posibles.

Dado que estudios previos han mostrado efectos citotóxicos de las NP en determinadas condiciones de exposición en sistemas biológicos, es crucial el estudio del transporte y la disolución de NP en matrices porosas como el suelo. Eso como herramienta de apoyo para entender y predecir

el comportamiento, ciclo de vida y posibles efectos de las NP en matrices porosas del medio ambiente, o bien para establecer las condiciones que propicien aplicaciones de las NP de forma sustentable y con riesgos mínimos en los ecosistemas y en la salud humana.

El transporte de NP y liberación de iones en matrices ambientales como suelos agrícolas, depende de varios factores fisicoquímicos del suelo, como materia orgánica, conductividad, flujo, pH, iones presentes, etc., así como de las propiedades las nanopartículas como el tamaño, carga, química en la superficie, concentración, entre otros. Varios estudios han evaluado el transporte de NP, usando como modelo de matriz porosa, principalmente a la arena pura ^[4,6]. En otros estudios también se ha reportado el transporte y disolución de NP en suelos pre-acondicionados para homogenizar el tamaño de partícula y componentes del suelo, lo cual idealiza de cierto modo la interacción de las NP en el suelo ^[7]. La forma más real de evaluar la movilidad y disolución de las NP en el suelo, es a través de pruebas con núcleos de suelo *in situ* o bien en núcleos de suelo inalterados *ex situ*, de manera que se conserve en la medida de lo posible la estructura y porosidad del suelo. Al respecto, hay muy pocos reportes sobre la movilidad de NP en suelos inalterados ^[8], por lo que este trabajo se orientó a evaluar la movilidad y disolución de NPs CuO y ZnO en columnas de suelo rizosférico inalterado de una Nogalera de la región de Chihuahua. Esto con el fin de predecir su comportamiento y posibles efectos en suelos agrícolas con características similares, así como de establecer el potencial de las NP para suministrar microelementos de Zn y Cu en cultivos agrícolas. El estudio también conllevó la caracterización apropiada de las NP y del suelo.

3. Condiciones experimentales

3.1. Obtención y caracterización de muestras de suelo y de las NP

Las muestras de núcleos de suelo rizosférico se obtuvieron en cinco puntos distantes de una huerta nogalera en Delicias, Chihuahua, en la ubicación 28°13'41.3" latitud norte y 105°22'32.8" latitud sur. Previa limpieza de la superficie, se excavaron núcleos de suelo de 5x13 cm de diámetro y altura, a una profundidad de aproximadamente 20-30 cm. Parte de las muestras se juntaron para conformar una muestra compuesta y se realizó su caracterización edafológica, que incluyó parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad, materia orgánica, metales, entre otros. Esos parámetros se tomaron en cuenta para la interpretación de la movilidad de las NP en las columnas de suelo.

La síntesis de NP CuO se llevó a cabo por el método de precipitación alcalina, siguiendo un procedimiento descrito previamente ^[9], y se obtuvieron NP CuO cuasi-esféricas de 6.94 ± 2 nm de diámetro. Las NP ZnO se adquirieron en polvo a través de Sigma Aldrich, y acorde a su caracterización por microscopía electrónica de transmisión (MET) y con ayuda del software Image J se calculó la distribución de un tamaño promedio de 43.5 ± 24.5 nm de diámetro.

3.2. Dispersiones de NP y medición de tamaño hidrodinámico y potencial z

Previo al ensayo de transporte en columnas, las NP de CuO y ZnO se dispersaron en trizma® base 1 y 5 mM con citrato 0.52 y 2 mM, respectivamente, homogenizadas adecuadamente en un sonicador de baño por 1 h. El tamaño hidrodinámico (TH) y el potencial z, se midieron en dispersiones con 100 mg NP/L recién preparadas, por medio de un equipo nanosizer de Malvern, considerando un índice de refracción de 2.4 y 2.8 en las NPs con ZnO y CuO, respectivamente. También se midió la estabilidad de las dispersiones de NP, tomando la fase dispersa después de su reposo por 24 h y posterior digestión ácida con HCl para la cuantificación del Cu o Zn por medio de espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, por sus siglas en inglés).

3.3. Transporte y disolución de NP en columnas de suelo

El transporte y disolución de las NP se evaluó en columnas de acrílico de 18x5.08 cm de altura y de diámetro interno, respectivamente. En la parte inferior de la columna se colocó un filtro de fibra de vidrio con porosidad de 145 a 174 μm , luego se transfirieron cuidadosamente los núcleos de suelo de 10 cm de longitud a las columnas, para mantenerlos lo más intactos posible. Enseguida, se saturó la columna de suelo con entre 6-8 volúmenes de poro (VP) de buffer trizma 10 mM a pH 7.8, alimentados a un flujo descendente de 1 mL/min con una bomba peristáltica. Luego, se alimentaron 3VPs de la dispersión de NP (100 mg/L) mantenidas en agitación, seguidos de 9 VP del buffer trizma respectivo a la NP, esto bajo el mismo flujo. Desde el inicio hasta el final del ensayo, se colectaron muestras a la salida de la columna, cada 20 min, equivalentes a 20 mL cada una. En todas las muestras se analizó el pH y en una alícuota de 4 mL de muestra se analizó la fracción soluble y la fracción nanoparticulada (en suspensión) de Cu o de Zn por ICP-OES. Previo al análisis, las muestras se prepararon adecuadamente, para separar las NP del sobrenadante se centrifugaron a 7700 rcf por 30 min. La Figura 1, ilustra el transporte de las NP en la columna del suelo, con flujo descendente, simulando el flujo de riego en suelos agrícolas.

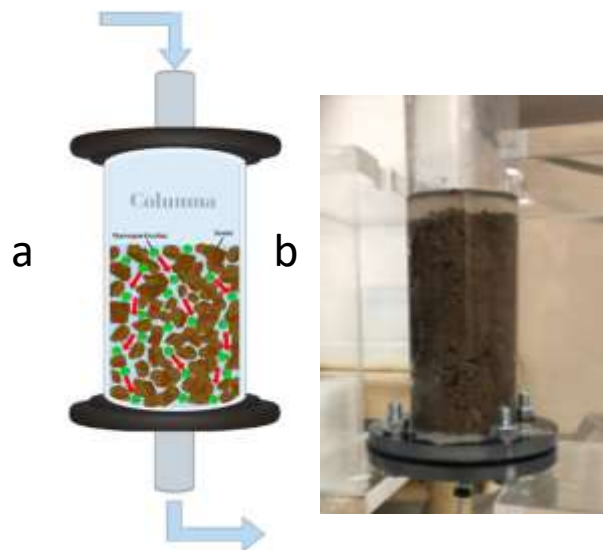


Figura 1. Esquema ilustrativo de: a) columna del transporte de NP en una matriz de suelo con flujo descendente en condiciones saturadas y b) columna experimental con el núcleo de suelo nogalero para el transporte de las NP.

4. Resultados y discusión

Las características fisicoquímicas de las NP y del suelo influyen en el transporte de NP y liberación de iones en matrices ambientales, por eso es importante caracterizarlos apropiadamente para realizar estudios de la movilidad de las NP y liberación de iones en matrices como el suelo.

4.1. Características fisicoquímicas del suelo rizosférico de nogal

El análisis edafológico de la muestra compuesta de suelo rizosférico de nogal se muestra en la Tabla 1, la cual muestra una clasificación textural de tipo Franco arcilloso con naturaleza moderadamente alcalina (pH 7.73) y contenido medio de materia orgánica. También se observa deficiencia de los micronutrientes de Cu y Zn, con tan sólo 1 y 11.76 ppm, respectivamente. En general, el suelo mostró propiedades algo similares a los reportados previamente para este tipo de suelo [3,4]. Solamente difiere un poco en los valores de densidad aparente y porosidad, los cuales son un poco menores, y se debe a que estos corresponden a un núcleo de suelo inalterado, que conserva la compactación natural y todos los componentes del suelo agrícola, mientras que en los reportes previos las muestras de suelo se acondicionaron por un tamiz malla 10 (2 mm), para homogenizar el tamaño de partícula. Los valores de la caracterización fisicoquímica, como pH, conductividad, porosidad, entre otros, se tomaron de referencia para el estudio de transporte de NPs CuO.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo rizosférico de nogal

Propiedades físicas de la arena comercial				
Densidad aparente		1.13		
Porosidad		0.31		
Análisis edafológico del suelo de nogal				
Textura del suelo	Parámetro	Valor	Parámetro (ppm)	Valor
Arena: 43.89% Limo: 25.28 % Arcilla: 30.83%	Conductividad (dS/m)	1.6	Fe	4.86
	pH	7.73	Mn	7.94
	% Materia orgánica	3.43	Zn	11.76
Franco-arcilloso	% CaCO ₃	5	Cu	1.0
	% Saturación	55	Mg	408
	CIC meq/100g	29.74	Na	337
			K	722

4.2. Estabilidad de las dispersiones de NP CuO y ZnO

El valor del potencial zeta es una medida de la carga superficial de las NP, la cual determina su estabilidad coloidal o grado de agregación, dependiendo de la densidad de carga, y esto a su vez se puede relacionar con el tamaño hidrodinámico (TH) de las NP en el medio de dispersión. Las dispersiones de NP CuO y ZnO en trizma® base 1 y 5 mM con citrato 0.52 y 2 mM, respectivamente, presentaron valores de potencial z de 24.7 ± 1.76 y 37.7 ± 2.73 mV, los cuales corresponden a dispersiones estables que oscilan en valores absolutos de potencial z entre 20-30 mV ^[10]. En relación al tamaño hidrodinámico los valores correspondientes a las dispersiones de NP CuO y ZnO, fueron de 247 ± 50.1 y 269 ± 12.7 nm, los cuales son relativamente cercanos y denotan que, aunque hay un grado de aglomeración, mantienen una dispersión estable con TH nanométricos. La estabilidad de las NP se corroboró al medir el contenido de Zn o de Cu en la fase dispersa de las dispersiones de NP, después de estar en reposo por 24 h. En la Figura 2, se nota que el Zn y Cu cuantificados como “suspendido” superan el 50% de la cantidad total correspondiente en las dispersiones recién

preparadas. Lo que indica que más de la mitad de las NP se mantuvieron en dispersión a las 24 h y el resto tendió a sedimentarse. También se nota que las dispersiones de NP ZnO fueron un poco más estables, ya que el porcentaje de Zn suspendido fue mayor que el porcentaje de Cu suspendido, lo cual coincide con el valor de potencial z mayor y TH un poco menor en las dispersiones de NP ZnO con respecto a las NP CuO. La estabilidad en las dispersiones de las NP es importante para estudiar su movilidad en matrices porosas como el suelo, ya que cuando se forman aglomerados grandes se pueden atascar en los poros.

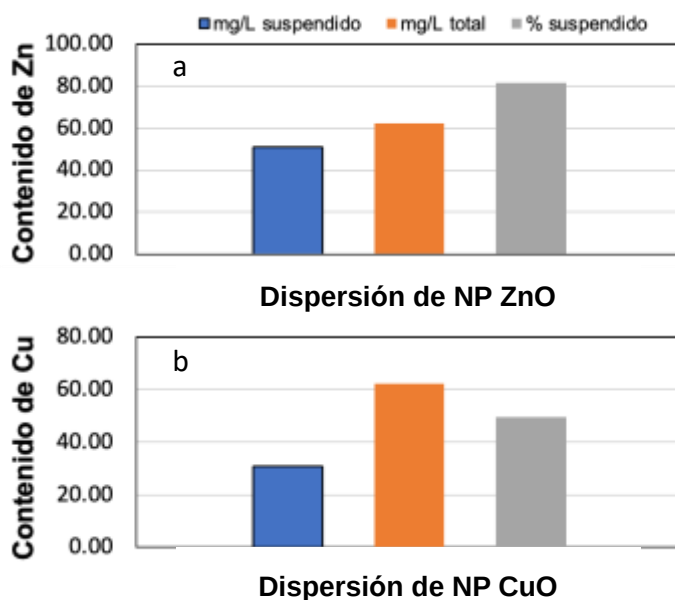


Figura 2. Valores del contenido de Zn y de Cu en la fase dispersa y el respectivo porcentaje en dispersión, de las dispersiones de nanopartículas de NP ZnO (a) y de NP CuO (b), después de mantenerse en reposo por 24 h.

4.3. Curvas de ruptura del transporte de NP de CuO y ZnO en suelo inalterado de nogal

Las curvas de ruptura (CR) de las NPs y de la fracción soluble se obtuvieron para representar su comportamiento de transporte y disolución en columnas de suelo rizosférico inalterado de nogal. Las CR se graficaron en concentraciones normalizadas (C/C_0) de NP y en porcentaje de la fracción soluble del ion metálico, ambos en función del número de volumen de poro. Las CR de las NP ZnO y NP CuO se realizaron en columnas por duplicado y estas se presentan en la Figura 3a y 3c, respectivamente. En general las CR de las NP tienen una simetría similar, con picos alrededor de 3 VP para las NP CuO y un poco menos de 2 VP para las ZnO. Esto indica que las NP ZnO se movilizan un poco más rápido que las NP CuO, lo cual coincide con la baja variabilidad en el tamaño hidrodinámico y mayor estabilidad en la dispersión de las NP ZnO. No obstante, la movilidad de ambas

NP en la columna de suelo inalterado de nogal, es baja, dado que la fracción C/C_0 de las NP en el efluente rondó valores de 0.01. La baja movilidad de las NP indica que la mayoría de las NP se retienen en la columna de suelo, lo cual se explica por la posible deposición de las NP propiciada por fuerzas atractivas entre la carga positiva de las NP y la carga negativa de componentes del suelo como la arena (-46.4 mV) [11] y con ácidos húmicos de la materia orgánica, que en suelo presentó contenido medio de esta. En un estudio reciente, se mostró mayor retención de NP CuO en arena cuando se suministra ácido húmico [4].

También es notable que las CR de las NP CuO varían un poco entre sí, lo cual se asocia a las posibles diferencias en la heterogeneidad estructural de las columnas del suelo inalterado, las cuales se controlan cuando se acondiciona el suelo a tamaños de partícula homogéneos. No obstante, este tipo de variaciones representan casos de suelos en condiciones reales en campo.

En relación con las CR de la fracción soluble de Cu y Zn (Figura 3 b y d), se observaron porcentajes alrededor 3 veces más altos en las curvas de Zn que en las de Cu, lo cual podría asociarse con una mayor interacción de las NP ZnO con componentes de la materia orgánica del suelo propiciada por el tamaño un poco menor y la estabilidad mayor de las NP ZnO [4]. En un estudio previo también se reportó mayor solubilidad de NP ZnO que de NP CuO en suelos tratados con NPs por hasta 30 días, en ensayos en lote [2]. En ese estudio las ZnO NP también tuvieron tamaño más pequeño que las NP CuO, por lo que el grado de interacción de las NP con componentes del suelo también pudo ser clave en su solubilización.

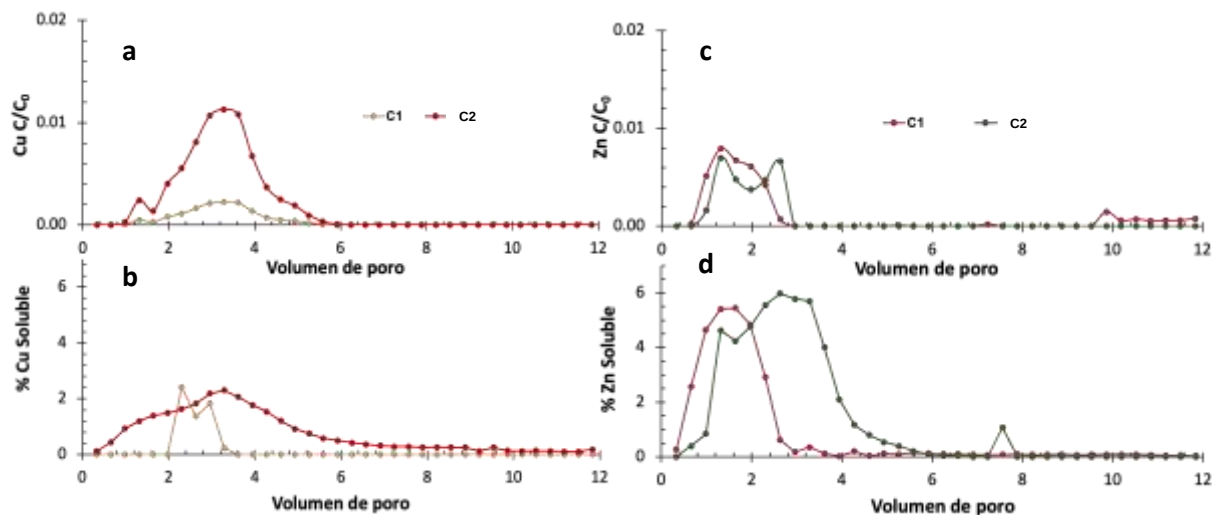


Figura 3. Curvas de ruptura de NP CuO y ZnO (a y c) de la disolución de Cu y ZnO (b y d) en columnas de suelo rizosférico inalterado de nogal, en condiciones saturadas.

5. Conclusiones

El suelo rizosférico inalterado de nogal se clasificó como franco arcilloso y mostró valores de saturación y de porosidad asociados con la compactación natural del suelo. Por su parte, las

dispersiones de NP de ZnO y NP CuO se identificaron como estables y con tamaños hidrodinámicos (TH) en escala nanométrica, notando más estabilidad y menor variabilidad del TH para las dispersiones de NP ZnO. La movilidad de las NP en columnas del suelo de estudio fue muy baja, lo que corresponde a una alta retención de las NP en el suelo, que se explica por las interacciones de cargas que se favorecen entre las NP y componentes del suelo como arena y materia orgánica. Las NP de ZnO mostraron una movilidad un poco mayor y su solubilización fue 3 veces más alta que lo observado para las NP CuO, asociado a la mejor estabilidad y menor TH de las NP de ZnO. Los resultados sugieren que las NP de ZnO y CuO podrían proveer iones Cu y Zn en la zona rizosférica de cultivos en suelos con características similares al evaluado, con deficiencia de esos elementos, como alternativa más sustentable a las formas convencionales de suministrar micronutrientes, ya que la alta retención y lenta solubilización de ambas NP, limitaría la infiltración y favorecería su aprovechamiento por los cultivos.

Agradecimientos: Los autores agradecen a Flores-Luna D. por su apoyo en la elaboración del esquema ilustrativo de la columna experimental. También al CIMAV por el financiamiento (26016).

6. Bibliografía

1. Ali, A.; Phull, A. R.; Zia, M. (2018). Elemental zinc to zinc nanoparticles: Is ZnO NPs crucial for life? Synthesis, toxicological and environmental concerns. *Nanotechnol. Rev*, 7, 413– 442. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2018-0067>
2. Joško, I., Dobrzyńska, J., Dobrowolski, R., Kusiak, M., Terpiłowski, K. (2020). The effect of pH and ageing on the fate of CuO and ZnO nanoparticles in soils. *Science of The Total Environment*, 721, 137771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137771>.
3. Salas-Leiva, J., Salas-Leiva, D.E., Tovar-Ramírez, D., Herrera-Pérez, G., Tarango-Rivero, S., Luna-Velasco, A., Orrantia-Borunda, E. (2021). Copper oxide nanoparticles slightly affect diversity and metabolic profiles of the prokaryotic community in pecan tree (*Carya illinoensis*) rhizospheric soil. *Applied Soil Ecology*, 157, 103772. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103772>
4. Condori-Chambi, C., Estrada-Acosta, D., Salas-Leiva, JS., Tarango-Rivera, S., Luna-Velasco, A. (2022). Influencia del ácido húmico en el transporte de nanopartículas de CuO a través de una matriz porosa representativa de un suelo agrícola. Capítulo en: *Innovación y suelos sanos para el desarrollo sustentable*. Eds. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV- Unidad Saltillo). ISBN Digital 978-607-9023- 67-6.
5. Zafar, H., Aziz, T., Khan, B., Mannan, A., Rehman, R., Zia M. (2020). CuO and ZnO Nanoparticle Application in Synthetic Soil Modulates Morphology, Nutritional Contents, and Metal Analysis of *Brassica nigra*. *ACS Omega* 2020 5 (23), 13566-13577. DOI: 10.1021/acsomega.0c00030
6. Tiwari, E., Khandelwal, N., Singh, N., Darbha, G.K. (2022). Influence of natural soil colloid's stability on transport of copper-based nanoparticles in saturated porous media. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100633. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100633>.

7. Xu, Z., Hu, X., Ding, Z. et al. Retention of nano PbO in saturated columns and its dissolution kinetics in soils. *Environ Sci Pollut Res* 27, 1167–1174 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07003-y>
8. Rahmatpour, S., Mosaddeghi, M.R., Shirvani, M., Šimůnek, J. (2018). Transport of silver nanoparticles in intact columns of calcareous soils: The role of flow conditions and soil texture. *Geoderma*, 322, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.016>.
9. Salas-Leiva, J.S., Herrera-Pérez, G., Palma-Cano, L.E., Rojas-George, G., Ornelas-Gutierrez, C., Luna-Velasco, A. (2019). Structural and Microstructural Analysis for CuO Nanoparticles Prepared by Precipitation Method. *Microscopy and Microanalysis*, 25:2. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1431927619010651>
10. Pochapski, D.J., Carvalho dos Santos, C., Wosiak Leite, G., Pulcinelli, S.H., Santilli, C.V. (2021). Zeta Potential and Colloidal Stability Predictions for Inorganic Nanoparticle Dispersions: Effects of Experimental Conditions and Electrokinetic Models on the Interpretation of Result. *Langmuir*, 37 (45), 13379-13389. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c02056
11. Mengestab, T. (2015). Fate and Transport of Nano-TiO₂ in Saturated Porous Media: Effect of pH, Ionic Strength and Flow Rate (Publication Number 312) [Student thesis, DiVA. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-252835>

Bioaccesibilidad pulmonar en partículas del aire finas y ultrafinas (PM 10 y 2.5).

Carlos Daniel Jiménez González^{1*}; Ernesto Hernández-Mendiola^{2,3}, Margarita E. Gutiérrez-Ruiz⁴,

jjimenez.gonzalez.carlos123@gmail.com,

¹Facultad de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México, México

²Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

³Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía LANGEM, México

⁴Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

*** Autor de correspondencia**

Resumen

Actualmente, el problema de la contaminación del aire en las manchas urbanas es de vital importancia, ya que la contaminación del aire se ha relacionado con la morbilidad y la mortalidad en áreas muy contaminadas. En este contexto, las partículas más dañinas para la salud son la materia particulada (PM, por sus siglas en inglés) con un diámetro igual o menor a 10 y 2.5 micrómetros (μm) (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$). Las PM_{10} se alojan en el tracto respiratorio superior y las $\text{PM}_{2.5}$, las cuales pueden llegar a los pulmones y potencializan el riesgo a la salud humana. Además de su naturaleza física, estas partículas pueden contener elementos potencialmente tóxicos (EPT) que puedan poner en riesgo a la población que esté expuesta.

La exposición a partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) de diámetro o menores, generadoras de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, además de cáncer pulmonar, impacta sobre todo a personas que viven en países de ingresos bajos y medianos y que soportan desproporcionadamente la carga de la contaminación del aire de exteriores, según estudios de la Organización Mundial de la Salud ([Organización Mundial de la Salud \[OMS\], 2022](#)).

Realizar análisis que enfaticen no sólo el tamaño de partículas sino también su composición química, mineralógica y su bioaccesibilidad resulta de vital importancia al momento de determinar tanto las fuentes de emisión de contaminación, así como el daño real que pueden producir a la salud humana, ya que un alto contenido de EPT en las partículas ultrafinas especialmente de compuestos orgánicos (especialmente los hidrocarburos aromáticos policíclicos), sulfatos (SO_4), nitratos (NO_3^-) y determinados metales como arsénico (As), cadmio (Cd), hierro (Fe), zinc (Zn) y níquel (Ni) puede variar su bioaccesibilidad, dependiendo de las condiciones meteorológicas en las que se encuentren suspendidas y de las condiciones biológicas a las que estén expuestas.

1.Introducción

La extensión de las manchas urbanas de las grandes ciudades aumenta la **contaminación del aire**, dado que modifica el paisaje, cambia el uso del suelo, pero además durante las actividades antrópicas contribuye al aumento de fuentes fijas como las industrias y fuentes móviles como los vehículos automotores. Esto favorece un ambiente propicio para que partículas de diferentes tamaños puedan ser transportadas durante mayor tiempo y distancia, propiciando que un mayor número de personas puedan estar expuestas a respirar aire de mala calidad ([OMS, 2022](#)).

La exposición a contaminantes atmosféricos puede conllevar al desarrollo de enfermedades o a aumentar la morbilidad y mortalidad de la población. La materia particulada (PM, por sus siglas en inglés) se forma por diferentes procesos físicos y

químicos. Por ejemplo, la materia particulada “gruesa” ($2.5 \mu\text{m} > \text{PM}_{10} < 10 \mu\text{m}$) es producto de procesos mecánicos de erosión y transporte, evaporación de aerosoles, suspensión de polvos y reacciones químicas de gases en superficies de partículas; la materia particulada fina ($2.5 \mu\text{m} \leq \text{PM}_{2.5}$), es producto de la condensación de gases, coagulación de partículas pequeñas, evaporación y condensación de neblina o gotas de agua en donde pueden estar disueltos gases; y las partículas ultrafinas ($0.1 \mu\text{m} \leq \text{PM}_{0.1}$), que son producto de combustión y actividad fotoquímica, nucleación y condensación de gases atmosféricos como H_2SO_4 , NH_3 , NO_x , y algunos compuestos orgánicos.

Físicamente, las PM_{10} se depositan en la región extratorácica del tracto respiratorio (nariz, boca, faringe y laringe), comúnmente son producto de la erosión de materiales de la corteza terrestre, sin embargo, en ambientes urbanos, pueden reflejar la erosión de materiales sintéticos de origen antrópico como las partes de desgaste de vehículos automotores como pastillas de frenado y los cerámicos que se utilizan en los convertidores catalíticos (Yang et al., 2019 y Meza-Figueroa et al., 2020). También pueden contener materia orgánica producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles, polen y pueden transportar agentes biológicos como esporas, virus o bacterias.

Las $\text{PM}_{2.5}$ son de alta preocupación ya que pueden alcanzar las vías respiratorias inferiores o intratorácicas y generalmente se depositan en la región traqueobronquial (tráquea hasta los bronquios) aunque también pueden ingresar a los alvéolos, incrementando la posibilidad de atravesar la membrana alveolar e incorporarse de forma inmediata al torrente sanguíneo y así migrar hacia otros órganos. La exposición a $\text{PM}_{2.5}$ o menores se ha asociado al desarrollo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, además de cáncer pulmonar (Yang et al., 2019).

La composición química de las partículas juega un papel importante con relación a los daños específicos a la salud y varía de un sitio a otro, dependiendo de la fuente de emisión, así como de las condiciones geográficas y meteorológicas. El mayor impacto en la salud por partículas finas y ultrafinas, lo originan compuestos altamente tóxicos y carcinogénicos como el carbono elemental, compuestos orgánicos (especialmente los hidrocarburos aromáticos policíclicos), sulfatos (SO_4), nitratos (NO_3^-) y determinados metales como arsénico (As), cadmio (Cd), hierro (Fe), zinc (Zn) y níquel (Ni). Actualmente se sabe que los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) contenidos en las partículas pueden estar relacionados con daño cerebral en respuesta a procesos inflamatorios en habitantes de grandes urbes como la Ciudad de México. García-Cuellar et al., 2002 señalan que el contenido geodisponible de metales como vanadio (V), cobre (Cu) y Ni de las PM_{10} se asocia con el daño al material genético como el ácido desoxirribonucleico (ADN) in vitro (García-Cuellar et al., 2002).

Actualmente, la normatividad mexicana ha establecido límites para la cantidad de partículas suspendidas PM_{10} para una exposición crónica de $40 \mu g/m^3$, mientras que para las $PM_{2.5}$ establece un valor máximo de $12 \mu g/m^3$, ambos considerando un promedio anual. No obstante, no se considera la composición química, mineralógica, ni la bioaccesibilidad de los EPT en dichas partículas, pudiendo ser estas características, la clave para determinar su peligrosidad y establecer el riesgo a la salud de la población.

Estudios recientes han demostrado que la concentración total de EPT como As, Pb, Ni, Zn, Mn y Fe, en partículas finas ($PM_{2.5}$) puede ser diferente a la concentración bioaccesible en los diferentes fluidos pulmonares, pudiendo variar de 0 al 100 % dependiendo del elemento y de las características mineralógicas de las partículas (Meza-Figueroa et al., 2020). Por ejemplo, Meza-Figueroa et al., (2020) señalan que en general, la bioaccesibilidad de los EPT estudiados es mayor en la solución Gamble (GS, por su siglas en inglés, que simula el epitelio pulmonar), en comparación con la bioaccesibilidad en el Fluido Artificial Lisosomal (ALF, por sus siglas en inglés, que representa el fluido de la fagocitosis producido por los macrófagos alveolares.

De tal forma, este estudio tuvo como objetivo, **colectar material particulado** fino y ultrafino suspendido en dos diferentes ambientes “outdoor” que representa el ambiente urbano (PU) e indoor que representa el ambiente al interior de un sitio cerrado (PM_{100} , PM_{10} y $PM_{0.3}$), estudiar su **composición química, mineralógica y determinar la bioaccesibilidad** de los EPT. Se pudo observar que las muestras de material particulado del ambiente urbano (PU) están caracterizados por alto contenido de SiO_2 , CaO, Al_2O_3 , SO_3 , Fe_2O_3 (43.87, 18.42, 12.20, 8.79, 8.34 %, respectivamente) y bajo contenido de K_2O , Na_2O , MgO y TiO_2 (2.24, 1.15, 1.12 y 1.01 %, respectivamente). El análisis de elementos traza reflejaron una concentración promedio de Ba, Zn, Cu, Sr, Pb, Zr, V, Cr, Ni (795, 2,616, 520, 388, 254, 205, 197, 131, 98 ppm, respectivamente). La composición mineralógica de estos polvos urbanos aéreos está caracterizada por la presencia de minerales como Anortita (33.6%), Calcita (28.5 %), Yeso (14.6 %), Anhídrita (11.4%), Cuarzo (9.1 %) y Hematita (2.8%).

Por otro lado, el material particulado indoor PM_{100} , presenta concentraciones altas de SiO_2 , CaO, Na_2O , (70.29, 13.46, 8.18 %, respectivamente) y bajas concentraciones de MgO, SO_3 , Al_2O_3 , Cl (2.09, 1.59, 1.40, 1.16 %, respectivamente). El análisis de elementos traza reflejaron concentraciones de Zn, Zr, Cu, Ba, Sr y Pb (646, 183, 94, 91, 44 y 6, ppm, respectivamente). En el caso de las partículas PM_{10} y $PM_{0.3}$ se encontró una composición química en abundancia relativa por área ($\mu g/cm^2$) de: Cl, Si, Na, Zn, Ca, Al, Fe, S, Ti, K (171.22, 156.73, 132.81, 89.84, 73.23, 65.12, 36.97, 33.88, 26.66, 13.03 $\mu g/cm^2$, respectivamente). La composición mineralógica predominantemente de estas partículas es predominantemente de cuarzo y de aluminosilicatos de calcio y magnesio con trazas de Fe y Na.

Se puede observar que existe una marcada diferencia en la composición química y mineralógica de las partículas outdoor e indoor. Las primeras reflejan una matriz que propia de los materiales de desgaste de las fuentes móviles como los componentes de las pastillas de frenado y de los cerámicos utilizados en los convertidores catalíticos caracterizados por elementos como Zr, Fe, Zn y Ni, así como un alto contenido de metales pesados como Pb. Por otro lado, las partículas indoor reflejan un bajo contenido de aportes de fuentes móviles, pero alto contenido de fuentes domésticas de Zn.

Los experimentos de bioaccesibilidad de los polvos urbanos aéreos (PU) reflejaron una alta disponibilidad de Pb, Cu, Zn y V, los cuales son EPT que están asociados al desarrollo de afectaciones neurotóxicas y al material genético (ADN), lo cual ha sido observado por otros autores también ([García-Cuellar et al., 2002](#)).

El desarrollo de este estudio ha permitido evidenciar que si bien el estudio de la composición química y mineralógico de partículas finas y ultrafinas aéreas, es primordial en el estudio del impacto ambiental, ya que permite vincular a la fuente de emisión. Es vital el estudio de la bioaccesibilidad pulmonar, ya que permite estimar el riesgo a la salud real asociado con la exposición a partículas finas y ultrafinas con alto contenido de EPT.

2. Metodología

2.1 Muestreo

Para realizar el estudio de las partículas finas y ultrafinas en diferentes ambientes outdoor e indoor, se utilizaron dos sistemas colectores que trabajaron continuamente durante 1 año.

La recolección del material aéreo outdoor (PU) se realizó con ayuda de un extractor de aire ubicado a una altura de 2 m para garantizar que el material colectado pertenece a material suspendido en el aire. Este lapso nos permitió recolectar 100 g de polvo urbano suspendido. Por otro lado, la recolección del material aéreo indoor (PM₁₀₀, PM₁₀ y PM_{0.3}) se realizó con ayuda de un extractor ubicado al interior de un domicilio particular a la altura de 90 cm.

2.2 Análisis de FRX y DRX

El material colectado fue colocado en bolsas y transportado al laboratorio para su posterior análisis. Para conocer la composición química se realizaron análisis de Fluorescencia de Rayos-X (FRX). Además, para conocer la composición mineralógica se realizaron análisis

de DRX, ambos análisis se realizaron en e en el laboratorio de Fluorescencia de rayos X del Instituto de Geología de la UNAM.

Para el análisis de FRX en las muestras de PU y PM₁₀₀, se pesaron 4g de cada muestra molida junto con una proporción de 0.7142 g de cera aglutinante, posteriormente se colocaron en un mortero para mezclar y homogeneizar la muestra; posteriormente se prensó a una presión de 28 Ton/ [in] ^2 durante 30 segundos por cada lado. Una vez preparada la lámina, se colocó en un porta muestra y se verifica el nivel de altura para asegurar que el equipo no vaya a tener ningún problema durante el análisis. Por otro lado, en el caso de los filtros PM₁₀ y PM_{0.3} se recortó un pedazo y se colocó directamente en el porta muestra para su análisis. En éstas 2 muestras el resultado del análisis de los elementos se da en una relación de µg/cm².

Para la preparación de muestras en DRX se tomaron 4 g de la muestra PU y PM₁₀₀, y se molieron en un mortero procurando que queden completamente trituradas y homogeneizadas; una vez teniendo molida la muestra, se coloca en un muestreador de aluminio y se compacta con ayuda de una pequeña placa de vidrio para conseguir una capa bien compactada y con superficie uniforme para poder ingresarla al equipo de Difracción.

Las muestras fueron analizadas en un intervalo angular de entre 4° y 70° de incidencia de rayos X en un tiempo de muestreo de 0.5 segundos por cada haz de rayo X.



Figura 1: Muestra Preparada para el análisis de DRX

2.3 Bioaccesibilidad

Se realizarón ensayos de bioaccesibilidad in vitro utilizando GS, con un pH de 7,4 para simular la condición del fluido intersticial entre las células pulmonares; y ALF, con un pH de 4,5 para representar el entorno más ácido en el fluido lisosomal de los macrófagos alveolares (Boisa et al., 2014). Para cada muestra recolectada (PU), tomamos 4

submuestras: 2 para GS y 2 para ALF, que se prepararon y analizaron (duplicados). Se siguió el mismo procedimiento para el estándar NIST 2710a y los blancos. El total de muestras preparadas para los ensayos de bioaccesibilidad in vitro fue de 32. GS se ha utilizado ampliamente para estudios de bioaccesibilidad ([Wiseman,2015](#)).

3. Resultados y discusión.

3.1 Resultados FRX

Las muestras de polvos urbanos nos permitieron conocer la composición química del polvo urbano suspendido (PU). En Tabla 1 se puede observar los análisis de FRX en las muestras de PU, en dicha tabla se observa una composición química de mayor a menor abundancia según SiO₂, CaO, Al₂O₃, SO₃, Fe₂O₃ (43.87, 18.42, 12.20, 8.79, 8.34 %, respectivamente) y bajo contenido de K₂O, Na₂O, MgO y TiO₂ (2.24, 1.15, 1.12 y 1.01 %, respectivamente).

PU-1						
Componer	Result	Unit	Det. Lim	El.lin	Intensit	w/o normz
SiO ₂	43.8796	mass%	0.01115	Si-KA	453.8639	30.7414
CaO	18.4259	mass%	0.00717	Ca-KA	261.2702	12.9089
Al ₂ O ₃	12.2088	mass%	0.01025	Al-KA	156.7485	8.5533
SO ₃	8.7994	mass%	0.0049	S-KA	129.7728	8.1648
Fe ₂ O ₃	8.3485	mass%	0.00518	Fe-KA	272.3705	5.8488
K ₂ O	2.2499	mass%	0.00309	K-KA	34.1757	1.5762
Na ₂ O	1.1543	mass%	0.01961	Na-KA	2.7056	0.8087
MgO	1.1225	mass%	0.00677	Mg-KA	6.4055	0.7864
TiO ₂	1.0071	mass%	0.01059	Ti-KA	3.4604	0.7056
P ₂ O ₅	0.7912	mass%	0.00336	P-KA	13.4698	0.5543
Cl	0.7437	mass%	0.00512	Cl-KA	6.7889	0.5211
ZnO	0.6206	mass%	0.00194	Zn-KA	71.9847	0.4348
MnO	0.1461	mass%	0.00361	Mn-KA	3.1881	0.1024
BaO	0.1035	mass%	0.02863	Ba-KA	0.1612	0.0725
CuO	0.0954	mass%	0.00213	Cu-KA	7.9939	0.0668
SrO	0.0846	mass%	0.00132	Sr-KA	37.4586	0.0593
V ₂ O ₅	0.0661	mass%	0.00822	V-KA	0.4325	0.0463
ZrO ₂	0.0468	mass%	0.0078	Zr-KA	5.2863	0.0328
PbO	0.0463	mass%	0.00364	Pb-KA	4.3618	0.0324
Cr ₂ O ₃	0.0266	mass%	0.0058	Cr-KA	0.3703	0.0186
NiO	0.0181	mass%	0.00239	Ni-KA	1.1548	0.0127
Rb ₂ O	0.0082	mass%	0.0013	Rb-KA	3.5758	0.0058
Br	0.0037	mass%	0.00124	Br-KA	1.3098	0.0026
Y ₂ O ₃	0.003	mass%	0.00136	Y-KA	3.19685	0.0021

Tabla 1: Composición química (%) de la muestra (PU)

Filtro PM-100						
Componer	Result	Unit	Det. Lim	El.lin	Intensit	w/o normz
Total	[10185.9180]	mass%				
SiO ₂	70.2972	mass%	0.01052	Si-KA	538.8685	31.8227
CaO	13.4632	mass%	0.00499	Ca-KA	124.7443	6.0956
Na ₂ O	8.1873	mass%	0.01513	Na-KA	12.999	3.7089
MgO	2.0963	mass%	0.00556	Mg-KA	8.0786	0.9491
SO ₃	1.5924	mass%	0.00333	S-KA	13.8676	0.721
Al ₂ O ₃	1.4006	mass%	0.00371	Al-KA	12.005	0.6341
Cl	1.1655	mass%	0.00546	Cl-KA	6.5818	0.5277
Fe ₂ O ₃	0.7255	mass%	0.00344	Mn-KA	0.2667	0.0073
K ₂ O	0.4802	mass%	0.00191	K-KA	4.4589	0.2174
ZnO	0.2167	mass%	0.00151	Zn-KA	23.6304	0.0981
TiO ₂	0.1621	mass%	0.0095	Ti-KA	0.3919	0.0734
P ₂ O ₅	0.0971	mass%	0.00262	P-KA	0.9619	0.044
ZrO ₂	0.0528	mass%	0.00106	Bi-KA	28.71	0.0239
CuO	0.0207	mass%	0.00178	Cu-KA	1.6193	0.0094
MnO	0.0162	mass%	0.00318	Fe-KA	18.228	0.3285
SrO	0.0157	mass%	0.00101	Sr-KA	6.9023	0.0071
NiO	0.0072	mass%	0.00195	Ni-KA	0.4264	0.0033
Rb ₂ O	0.0034	mass%	0.00098	Rb-KA	1.3849	0.0015

Tabla 2: Composición química (%) de la muestra (PM₁₀₀)

En la Tabla 2 el material particulado indoor PM₁₀₀, presenta concentraciones altas de SiO₂, CaO, Na₂O, (70.29, 13.46, 8.18 %, respectivamente) y bajas concentraciones de MgO, SO₃, Al₂O₃, Cl (2.09, 1.59, 1.40, 1.16 %, respectivamente). El análisis de elementos traza reflejaron concentraciones de Zn, Zr, Cu, Ba, Sr y Pb (646, 183, 94, 91, 44 y 6, ppm, respectivamente).

En las Tablas 3 y 4 de las partículas PM₁₀ y PM_{0.3} respectivamente, se encontró una composición química en abundancia relativa por área (μg/cm²) de: Cl, Si, Na, Zn, Ca, Al, Fe, S, Ti, K (171.22, 156.73, 132.81, 89.84, 73.23, 65.12, 36.97, 33.88, 26.66, 13.03 mg/cm², respectivamente). La composición mineralógica predominantemente de estas

partículas es predominantemente de cuarzo y de aluminosilicatos de calcio y magnesio con trazas de Fe y Na, las cuáles podemos verificar en la Tabla 5

Filtro PM-10						
Component	Result	Unit	Det. Lim	El. line	Intensit	Liquid Co
Total	[10185.9160]	µg/cm2				
C6H10O5	9366.3847	µg/cm2				
Cl	171.2213	µg/cm2	134.42724	Cl-KA	55.3636	10758.1547
Si	156.7368	µg/cm2	31.01904	Si-KA	82.0671	9848.0641
Na	132.8175	µg/cm2	424.17917	Na-KA	7.1963	8345.1718
Zn	89.8464	µg/cm2	26.72426	Zn-KA	188.046	5645.2169
Ca	73.2366	µg/cm2	18.89907	Ca-KA	49.3637	4601.5902
Al	65.1277	µg/cm2	33.99907	Al-KA	30.5582	4092.0916
Fe	36.9767	µg/cm2	26.46254	Fe-KA	41.2081	2323.3136
S	33.8847	µg/cm2	14.7191	S-KA	42.478	2129.0406
Ti	26.6679	µg/cm2	44.78864	Ti-KA	6.0186	1675.5945
K	13.0318	µg/cm2	15.01332	K-KA	7.6171	818.8124
Mg	7.9265	µg/cm2	43.01607	M-KA	1.3506	498.0343
P	7.2297	µg/cm2	15.08185	P-KA	9.3163	454.2528
Sr	2.0976	µg/cm2	41.78873	Sr-KA	4.5395	131.7938
Cu	1.4322	µg/cm2	23.71278	Cu-KA	2.5887	89.9908
Bi	1.2977	µg/cm2	72.59323	Bi-KA	1.1454	81.5361

Tabla 3: Composición química (%) de la muestra (PM₁₀)

Filtro PM-0.3						
Component	Result	Unit	Det. Lim	El. line	Intensit	Liquid Co
Total	[10185.9160]	µg/cm2				
C6H10O5	7083.3335	µg/cm2				
Si	1515.4547	µg/cm2	108.75463	Si-KA	610.7111	95218.8261
Na	397.2074	µg/cm2	820.08821	Na-KA	20.9589	24957.2746
Zn	324.8774	µg/cm2	30.46874	Zn-KA	580.7692	20412.6519
Ba	220.3321	µg/cm2	219.20717	Ba-KA	9.717	13843.8716
Al	185.9129	µg/cm2	70.40145	Al-KA	72.5575	11681.2496
Ca	189.6861	µg/cm2	38.10023	Ca-KA	68.7641	10661.694
K	120.651	µg/cm2	52.31087	K-KA	42.7982	7580.7264
S	56.4825	µg/cm2	23.20895	S-KA	38.9232	3548.902
Fe	47.3266	µg/cm2	26.55362	Fe-KA	39.6104	2973.6152
Cl	46.1201	µg/cm2	111.01053	Cl-KA	8.2753	2897.8118
Sr	5.6131	µg/cm2	38.48874	Sr-KA	11.4148	352.0804
Mg	5.549	µg/cm2	75.85063	Mg-KA	0.8196	348.6519
Ti	4.1253	µg/cm2	119.33535	Ti-KA	0.5994	259.2028
Zr	1.9152	µg/cm2	42.65577	Zr-KA	5.2165	120.3378
P	0.7993	µg/cm2	16.09523	P-KA	0.5734	50.2221
Cu	0.5301	µg/cm2	23.57553	Cu-KA	0.7992	33.3093

Tabla 4: Composición química (%) de la muestra (PM_{0.3})

Aplication name		TRAZAMINPAK-2			
	Anal.time	15:39:10	15:55:58	16:12:42	16:29:33
	Position	Center	Center	Center	Center
Components	Unit	PM 100	PU-1	PU-2	PU-3
Rb	ppm	8	47	49	50
Sr	ppm	44	387	388	389
Ba	ppm	91	712	808	867
Y	ppm	7	37	35	36
Zr	ppm	183	194	204	218
Nb	ppm	4	9	10	10
V	ppm	0	198	196	197
Cr	ppm	13	123	129	142
Co	ppm	-2	12	19	20
Ni	ppm	11	94	99	101
Cu	ppm	94	502	524	534
Zn	ppm	646	2957	2495	2396
Th	ppm	2	6	8	6
Pb	ppm	6	248	251	263

Tabla 5: Composición química de elementos traza (ppm) de la muestra (PM₁₀₀) y las muestras (PU)

De acuerdo con el análisis de elementos traza las muestras (PU) reflejaron una concentración promedio de Ba, Zn, Cu, Sr, Pb, Zr, V, Cr, Ni (795, 2,616, 520, 388, 254, 205, 197, 131, 98 ppm, respectivamente).

3.2 Resultados DRX

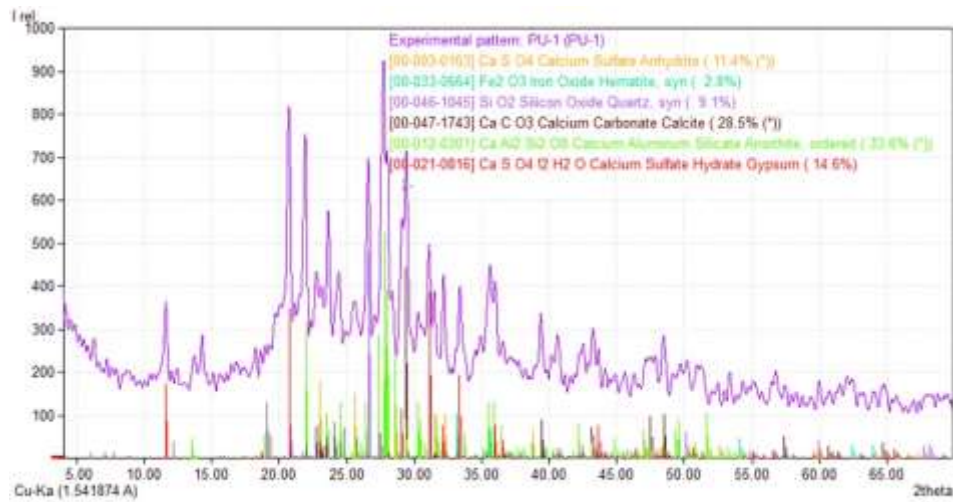


Figura 2: Difractograma (PU)

La composición mineralógica de las muestras PU (polvos urbanos aéreos) está caracterizada por la presencia de minerales como Anortita (33. 6%), Calcita (28.5 %), Yeso (14.6 %), Anhidrita (11.4%), Cuarzo (9.1 %) y Hematita (2.8%).

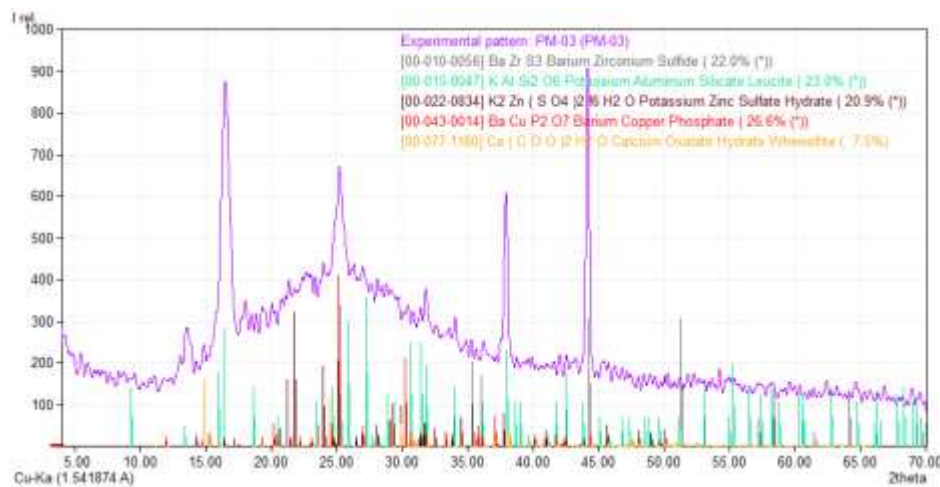


Figura 3: Difractograma (PM_{0.3})

En la Figura 3 se puede observar que las fases minerales predominantes en el material particulado $PM_{0.3}$ están presentes fases minerales como el cuarzo, aluminosilicatos de calcio y magnesio con trazas de Fe y Na.

4. Conclusiones.

Estudiar las características químicas, mineralógicas y la bioaccesibilidad de las partículas (PM_{100} , PM_{10} y $PM_{0.3}$) del aire en diferentes ambientes resulta de vital importancia en la actualidad, ya que conocemos los riesgos y enfermedades que se pueden contraer a partir de respirar las partículas finas y ultrafinas. Diversas fuentes de contaminación fijas y móviles, favorecen la erosión de estas partículas y constantemente aportan un mayor contenido de EPT al aire de las ciudades. La importancia de cuantificar la bioaccesibilidad de los EPT nos permite conocer el riesgo real a la salud de las personas a partir de la generación de ambientes controlados como lo son la GS y el ALF, este tipo de experimentos simulan condiciones biológicas humanas que nos permiten conocer la cantidad real que una persona absorbe de estos elementos.

5. Rererencias

- 6 Naturales, S. d. (21 de 08 de 2024). Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/particulas-suspendidas-pm10-y-pm2-5-danan-salud-y-medio-ambiente>.
- 7 Universidad de Burgos. (04 de 03 de 2020). Universidad de Burgos - Parque científico tecnológico. Recuperado el 29 de 05 de 2024, de <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/rayos-x/fluorescencia-de-rayos-x-frx>
- 8 García-Cuellar, C., Alfaro-Moreno, E., Martínez-Romero, F., Rosales, S. P. D. L., Rosas, I., Cárdenas, E. P., & Osornio-Vargas, A. R. (2002). DNA damage induced by PM_{10} from different zones of Mexico City. *Annals of Occupational Hygiene*, 46(suppl_1), 425-428.
- 9 NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-Secretaría de Salud. NOM-025-SSA1-2014.
- 10 Meza-Figueroa, D., Barboza-Flores, M., Romero, F. M., Acosta-Elias, M., Hernández-Mendiola, E., Maldonado-Escalante, F., ... & Pedroza-Montero, M. (2020). Metal bioaccessibility, particle size distribution and polydispersity of playground dust in synthetic lysosomal fluids. *Science of the Total Environment*, 713, 136481.
- 11 OMS <https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
- 12 Yang, Y., Ruan, Z., Wang, X., Yang, Y., Mason, T. G., Lin, H., & Tian, L. (2019). Short-term and long-term exposures to fine particulate matter constituents and health: A systematic review and meta-analysis. *Environmental pollution*, 247, 874-882.

- 13 Boisa, N., Elom, N., Dean, J.R., Deary, M.E., Bird, G., Entwistle, J.A., 2014. Development and application of an inhalation bioaccessibility method (IBM) for lead in the PM₁₀ size fraction of soil. Environ. Inter. 70, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.05.021>.

DESAROLLO DE EQUIPO PARA OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE LECHO MARINO

Rigoberto Nava Sandoval¹, Álvaro Núñez Flores², Ligia Pérez Cruz²

¹Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México

rigoberto.nava@icat.unam.mx

²Coordinación de la Investigación Científica CIC-COPO, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México

alvaro.nunez@cic.unam.mx

1. Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de dos tipos de equipo para la obtención de sedimento marino blando útiles en la exploración del subsuelo oceánico, lo que les permite a los investigadores generar información útil, por ejemplo, para realizar estudios ecológicos y de conservación en zonas marinas [1] o bien conocer los rasgos geológicos y antropogénicos, detectar cambios en la flora y fauna [2] entre muchos otros. Los aparatos diseñados y contruidos en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) descritos en este artículo son de dos tipos: Nucleador de tubos múltiple (*Multi Core*) y Nucleador de caja tipo Reineck (*Box Core*). Los primeros son aquellos en los que la muestra queda dentro de un tubo de policarbonato de 100 mm de diámetro con lo cual la muestra recibe el nombre de núcleo y su longitud o altura es variable. Estos nucleadores de tubos pueden obtener seis, ocho o doce núcleos en cada lanzamiento. Por otro lado, los nucleadores de caja tipo Reineck obtienen la muestra dentro de una caja rectangular de acero inoxidable 316L con dimensiones de 410 mm por lado y 580 mm de altura, una vez que el Nucleador se encuentra en cubierta del buque, los núcleos se obtienen insertando tubos de policarbonato en la muestra que viene dentro de la caja. Los dos tipos de nucleadores de sedimento marino se han probado en diferentes campañas Oceanográficas mostrando buen rendimiento en la obtención muestras útiles.

2. Introducción

Los nucleadores para obtención de muestras de lecho marino blando son ampliamente usados por los científicos estudiosos del suelo marino alrededor del mundo. Cada muestra obtenida dentro de un tubo recibe el nombre de núcleo cuya principal característica es conservar la estratificación intacta incluyendo en ocasiones el agua de las profundidades oceánicas en contacto con la capa superior del sustrato. La longitud del núcleo depende de la dureza de la sedimentación y de la fuerza con la que los tubos se introducen en el lodo, de cualquier manera, las capas geológicas deben permanecer inalteradas para su posterior estudio en el laboratorio.

3. Antecedentes

A finales del año 2009, el Centro de Investigación Científica y Enseñanza Superior de Ensenada (CICESE), solicitó a la Sección de Desarrollo de Prototipos (SDP) del CCADET, hoy ICAT, el desarrollo de un nucleador múltiple (multicorer) de 6 tubos de policarbonato de 100 mm de diámetro y 457 mm de longitud.

De acuerdo con la información que fue proporcionada a los desarrolladores del equipo por parte de los investigadores del CICESE a bordo del B/O Justo Sierra vía correo electrónico, el jueves 27 de julio del 2011, el multinucleador fue utilizado en aguas profundas del Golfo de México durante la campaña XIXIMI-2 estableciendo su récord a una profundidad de 3,740 m en la llanura abisal de Sigsbee. Contra todo pronóstico, se recogieron consistentemente entre 23 a 27 cm de sedimento en los seis núcleos, conservando la interfaz agua sedimento intacta para el estudio de diversos organismos que habitan a esas profundidades. Posteriormente el multinucleador se utilizó durante la campaña XIXIMI 3 batiendo su récord pues rebasó los 4,000 de profundidad.

4. Condiciones de operación

El lecho marino del cual se desea tomar muestras es relativamente blando de manera que pueden encajarse en él ya sea una caja, o bien tubos de policarbonato de 10 cm de diámetro los cuales penetran más o penetran menos dependiendo del peso añadido a los tubos y de la dureza del sedimento. La salinidad del ambiente marino es extremadamente corrosiva al contacto con el hierro o el acero al carbón por lo que es vital colocar una capa gruesa de pintura anticorrosiva protectora, o bien, construir el equipo en su totalidad con acero inoxidable del tipo 316L para prolongar la vida útil del aparato. Por otro lado, el diseño de los nucleadores es tal que soportan el manejo rudo durante la operación a bordo del buque oceanográfico ya que, debido al oleaje en ocasiones severo, los aparatos colisionan con partes del buque, pero también, en el descenso hacia las profundidades pueden caer sobre rocas del suelo marino sufriendo deformaciones que podrían impedir su buen funcionamiento.

5. Características deseables

Eficiencia. Que en cada lanzamiento se obtengan muestras útiles. El tiempo de operación de un buque oceanográfico es muy costoso por lo que cada vez que se lance el equipo y no se obtengan muestras eso se traduce en pérdidas económicas y tiempo desperdiciado.

Muestras útiles. Los núcleos deben estar conformados por las capas sedimentarias que naturalmente se formaron con el paso del tiempo, estas deben permanecer inalteradas, incluyendo la interfase agua-sedimento.

Facilidad de preparación. En cada lanzamiento, el equipo debe prepararse en el menor tiempo posible preferentemente usando únicamente las manos o bien, sin el empleo de herramientas especiales. Dependiendo del tipo de nucleador, la caja o los tubos se quitan y se ponen sin contratiempos, así como los mecanismos de disparo para cierre de las tapas que mantienen hermético el volumen donde se encuentra el núcleo obtenido.

Manejo seguro. Los nucleadores no tienen filos, todas sus aristas han sido redondeadas para evitar cortaduras durante su manejo, asimismo, no tienen mecanismos de cizalladuras que pudiesen cercenar o aplastar manos o dedos. También cuentan con asideras para asegurarlo con cuerdas para impedir la oscilación del equipo debido al oleaje durante su operación, pero también para dejarlo sujeto en cubierta cuando no se está usando para evitar deslizamientos sobre la cubierta.

Mantenimiento. En comparación con equipos pintados con pintura anticorrosiva los cuales requieren ser repintados periódicamente, los equipos de acero inoxidable 316L solamente necesitan ser enjuagados con agua dulce para evitar incrustaciones salinas.

Refacciones. No se requiere acudir al extranjero, todas las partes de desgaste se fabrican en el ICAT inclusive piezas dañadas por uso extremadamente rudo.

6. Nucleadores de múltiples tubos

Se caracterizan por tubos de policarbonato montados en una estructura con mecanismos aptos para taparlos herméticamente una vez que el sedimento ha quedado dentro de ellos. Uno de los problemas en el funcionamiento de los nucleadores de tubos es el oleaje el cual provoca tirones durante el descenso del equipo y en ocasiones el mecanismo de cierre de tapas se dispara antes de llegar al fondo. Por ello, los nucleadores de tubos tienen en común un amortiguador central para evitar esta situación.



Figura 1.- Nucleadores múltiples de 6, 8, 8 y 12 tubos

Por otro lado, se tienen dos tipos de mecanismos para el cierre de tapas inferiores. Uno de ellos es mediante un brazo que tiene adosada en un extremo la tapa inferior y en el otro un eje de giro, de tal suerte que la tapa describe un arco de círculo al pasar de la posición abierto a cerrado.

En la figura 2 se aprecia un brazo al lado del tubo de policarbonato que mantiene la tapa inferior lejos de su posición de cerrado con el fin de que el tubo penetre libremente en el sedimento. También se puede apreciar su correspondiente tapa superior abierta. Esa es la posición que deben tener durante el descenso hacia las profundidades del mar para que el agua pueda circular libremente dentro del tubo sin que las tapas provoquen resistencia.



Figura 2.- Tubo de policarbonato montado en estructura.

Una vez que el tubo ha penetrado en el lecho marino, el cable que mantiene abiertas las tapas se zafa automáticamente de los pernos que lo sujetaban. Es de notarse que la tapa superior es la primera en cerrar impidiendo por vacío, que el núcleo obtenido se salga del tubo. Por otro lado, la tapa inferior cae primero en el sedimento y se va desplazando hacia

su posición de cerrado en tanto el tubo se va sacando del lodo. El inconveniente es que en el trayecto de abierto a cerrado la tapa arrastra capa sedimentaria superficial y lo coloca bajo la capa sedimentaria antigua.

Para evitar la mezcla de sedimento superficial con el antiguo, se ha desarrollado otro mecanismo para cerrar la parte inferior del tubo. Este mecanismo consiste en una tapa deslizante en cada tubo que lo cierra a manera de guillotina una vez que ha colectado el núcleo.

En la figura 3, se pueden ver las guillotinas en posición de cerrado, pero también se observan unos aros afelpados donde se colocan los tubos. Obviamente, las guillotinas permanecen abiertas durante el descenso y los tubos pueden pasar a través de los aros para poder penetrar en el lecho marino y se cierran cuando los tubos se encuentran por encima de las mismas después de haber colectado los núcleos.

Las guillotinas llevan un resorte de cada lado obligándolas a mantenerse cerradas, pero gracias a un seguro permanecen abiertas hasta que dicho seguro se suelta mediante un cable de acero que los conecta con el mecanismo de cierre de las tapas superiores mostradas en la figura 5.



Figura 4.- Tapas deslizantes.



Figura 5.-Tapas superiores.

Para más detalles sobre este nucleador de 12 tubos puede verse el video "Operación del multinucleador de 12 tubos UNAM ICMY CCADET" en <https://www.youtube.com/watch?v=ev44cjilYw&t=13s>.

7.Nucleador de caja tipo reineck

A diferencia de los nucleadores múltiples, la muestra de lecho marino se obtiene mediante una caja mostrada en la figura 6, de sección cuadrada de 40 cm y 63 cm de alto la cual se introduce en el sedimento y una vez en la cubierta del barco se le introducen los tubos manualmente.

Obviamente la caja está montada en una estructura con mecanismos adecuados para introducir la caja en el sedimento y sellar la caja tanto en su parte inferior como superior. En la figura 7 se muestra la caja montada en dicha estructura.



Figura 6.- Caja de sedimentos



Figura 7.- Nucleador Reineck

Para conseguir una muestra del lecho marino con este nucleador de caja tipo Reineck, se lanza suspendido del cable de un malacate. El equipo debe estar armado como se muestra en las figuras 7 y 8, de manera que cuando llega al fondo del mar, la estructura tubular se posa en el suelo marino mientras que la caja adosada a la columna central sigue bajando por su propio peso y velocidad hasta introducirse en el sedimento.



Figura 8.- Tapa inferior abierta.



Figura 9.- Tapa inferior cerrada.

Debe notarse que, al pasar la columna por el centro de la estructura tubular, una leva acciona un pasador que libera el cable, de tal suerte que al izar el nucleador desde el

fondo, una tapa curva cierra la caja por abajo evitando que el sedimento contenido se salga como se muestra en la figura 9.

Para mayores detalles puede verse el video “Operación del Nucleador de Caja tipo Reineck” en <https://www.youtube.com/watch?v=s9V80PMWe68&t=243s>.

8.Extrusores de núcleos

Los tubos que contienen los núcleos son colocados en una gradilla como se muestra en la figura 10. Esto se hace con el fin de liberar al nucleador para aprovechar el tiempo ya que se vuelve a lanzar con otro juego de tubos vacíos y obtener nuevas muestras de lecho marino. Mientras tanto, los núcleos de la gradilla son extraídos uno a uno por medio del extrusor mostrado en la figura 11.

Para ello, un tubo con su respectivo núcleo se coloca en el extractor de tal manera que el émbolo empuje al sedimento hacia arriba en donde se encuentra una charola (fig. 12) la cual facilita coleccionar, etiquetar y clasificar el lecho marino desde la interfase agua sedimento hasta la parte más profunda penetrada por el tubo.



Fig. 10.- Gradilla.



Fig.-11.- Extrusor.



Fig.12.- Charola.

La porción de núcleo que sobresale del tubo se controla por un tornillo sinfín con un desplazamiento equivalente a 2 mm por vuelta.

Otro tipo de extractor mostrado en la figura 13, el émbolo está fijo y es el tubo el que se desplace hacia abajo con movimientos controlados utilizando una escalerilla con escalones de 5 mm, de tal manera que el sedimento puede colectarse en porciones de esta altura.



Figura 13.- Extrusor con escalerilla con escalones de 5mm

9. Conclusion

Se ha mostrado equipo para obtención de muestras de lecho marino blando desarrollados en la Sección de Desarrollo de Prototipos del ICAT con la participación de la Coordinación de Plataformas Oceanográficas (COPO).

Se ha constatado su eficacia y eficiencia por los usuarios finales durante diversas campañas llevadas a cabo tanto en el Golfo de México como en las costas del Océano Pacífico.

10. Referencias

- [1] 2017, Francisco J. Urcádiz-Cázares, Víctor H. Cruz-Escalona Enrique H., Nava-Sánchez, Alfredo Ortega-Rubio Hidrobiológica, Clasificación de unidades del fondo marino a partir de la distribución espacial de los sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz, Golfo de California; SCiElo Analtics, vol.27 no.3 Ciudad de México sep./dic.,2017.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972017000300399 (fecha de consulta abr/2024).
- [2] 2022, Millán Jacobo, Ana Cristina, Estudio geofísico para la caracterización del lecho marino en el campo M1 localizado en el Golfo de México. Repositorio Facultad de Ingeniería.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/17847> (fecha de consulta abr/2024)

Nuevos hallazgos de palinomorfos cenozoicos en rocas carbonatadas de la base de la Formación Tehuacán, Puebla, México.

Ramírez-Arriaga, E. ¹, López-Caballero G.I. ², Prámparo M.B. ³, Valiente-Banuet, A. ⁴, Martini M. ⁵

¹Instituto de Geología, Departamento de Paleontología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Cd. Mx., México. elia@unam.mx

²Facultad de Ciencias, UNAM, Ciudad Universitaria, Cd. Mx., México.
irilianalc@ciencias.unam.mx

³Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CCT CONICET, Mendoza, Argentina). mprampar@mendoza-conicet.gob.ar

⁴Instituto de Ecología, Departamento de Ecología de la Biodiversidad, UNAM, Ciudad Universitaria, Cd. Mx., México. avalient@ecologia.unam.mx

⁵Instituto de Geología, Departamento de Procesos Litosféricos, UNAM, Ciudad Universitaria, Cd. Mx., México. mmartini@geologia.unam.mx.

1. Resumen

La Formación Tehuacán constituye el relleno cenozoico principal del valle de Tehuacán-Cuicatlán, el cual fue depositado cuando la falla de Oaxaca se encontraba activa en el centro-sur de México, durante el Oligoceno tardío al Mioceno medio. La presente investigación tiene como objetivo reportar y analizar nuevos hallazgos paleopalinológicos en rocas carbonatadas pertenecientes a la base de la formación referida, ubicada al SW de la ciudad de Tehuacán. Se recolectaron y procesaron muestras de roca de dos secciones expuestas (FTB1 y FTB2), los conjuntos recuperados presentaron escasos palinomorfos con excelente preservación. Elementos de vegetación templada fueron registrados a nivel regional, mientras que a nivel local se observaron polen y esporas indicadoras de la selva baja caducifolia. En general, los espectros analizados hasta ahora difieren considerablemente de aquellos reportados en el techo de esta formación, por lo que es probable que estas rocas carbonatadas correspondan al Mioceno Inferior, cuando existieron temperaturas ligeramente más bajas que las correspondientes al óptimo climático del Mioceno Medio.

2. Introducción

La Formación Tehuacán se encuentra en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, estudios geológicos han confirmado que es el relleno cenozoico principal del valle, el cual fue depositado cuando la falla de Oaxaca se encontraba activa en el centro-sur de México del Oligoceno tardío al Mioceno Medio ^[1]. En el sector norte de la falla Oaxaca, Dávalos-Álvarez et al. ^[3] identificaron diferentes unidades

3. Condiciones experimentales

Todas las muestras fueron procesadas y registradas en la colección fósil (siglas Pb) del Laboratorio de Palinología: Paleopalínología y Actuopalínología del Departamento

de Paleontología del Instituto de Geología de la UNAM. La sección FTB1 (Pb-11355 a Pb-11369) y la sección FTB2 (Pb-11370 a Pb-11389) se ubican al SW de la ciudad de Tehuacán, Puebla (Figuras 1 y 2). Inicialmente, cada muestra de roca fue lavada individualmente con agua destilada y secada en una estufa. Posteriormente, las rocas fueron maceradas con la ayuda de un mortero. Cabe destacar, que debido a que se trata de calizas, se procesaron químicamente 150 g por muestra y empleando métodos convencionales con HCl, HF, acetólisis y flotación con politungstato de sodio. Asimismo, las preparaciones permanentes se elaboraron con bálsamo de Canadá, y fueron secadas en una estufa durante tres semanas, luego se analizaron en un microscopio Axiolab Zeiss con contraste de fases y con objetivo 100X. Por último, se registraron los diferentes palinomorfos en hojas de cálculo de Excel y se tomaron micrografías en campo claro y contraste de fases utilizando el programa AxioVision. Las láminas de palinomorfos fueron elaboradas con el programa Photoshop, los registros de los taxa se presentan en gráficos realizados con el programa Tilia Graph.

4. Resultados y discusión

A continuación, se presentan las columnas estratigráficas de dos secciones: la sección FTB1 con 15 muestras (Pb-11355 a Pb-11369), de las cuales seis resultaron positivas con palinomorfos y la sección FTB2 con 20 muestras (Pb-11370 a Pb-11389), resultando cinco muestras positivas, ambas ubicadas en la base de la Fm. Tehuacán, Puebla, México (Figura 2).

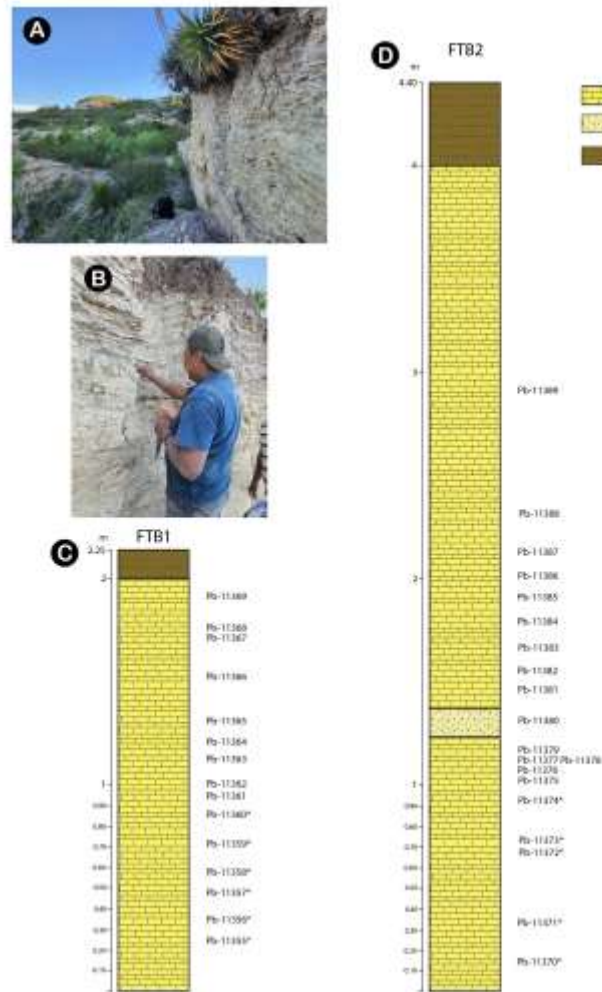


Figura 2. Formación Tehuacán: A) rocas carbonatadas de la base de la Fm. Tehuacán; B) limpieza de una sección expuesta; C) sección FTB1; D) sección FTB2. En ambas secciones se indican los números de las muestras colectadas y procesadas, así como las positivas (*) con palinomorfos.

Antes de exponer los resultados preliminares de ambas secciones, es importante destacar que las rocas carbonatadas se caracterizan por contener escasos palinomorfos, como lo demostró un estudio realizado en travertinos de Villa Alegría y Cerro Prieto del Plioceno-Pleistoceno en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán [5]. Afortunadamente, las rocas colectadas presentaban diferente grado de pureza, algunas mostraron aparente bandeamiento con ligero cambio de coloración, lo que sugirió la presencia de material

siliciclástico con materia orgánica incluida dentro de la roca carbonatada, lo anterior fue corroborado durante el proceso químico, cuando las muestras reaccionaron con el ácido fluorhídrico, indicando la presencia de silicatos. Por lo anterior, se incrementó la probabilidad de encontrar palinomorfos que hubiesen sido transportados y depositados durante el proceso de formación de estas rocas de origen químico.

En las secciones FTB1 y FTB2 la recuperación de polen fue escasa, pero con buena preservación (Figuras 3-5). Los taxa abundantes en los espectros palinológicos de la sección FTB1 fueron elementos anemófilos de vegetación templada, probablemente proveniente de las serranías, entre ellos *Fraxinus*, *Pinus*, *Alnus*, *Cupressus-Juniperus-Taxodium* (Cu-Ju-Ta), *Liquidambar*, *Betulaceae* y *Carya*, así como algunas esporas. Otros elementos ocasionales que posiblemente formaban parte de comunidades locales como la selva baja caducifolia fueron granos de polen de las familias *Amaranthaceae*, *Anacardiaceae*, *Asteraceae*, *Fabaceae*, *Onagraceae* y *Urticaceae* (Figura 3).

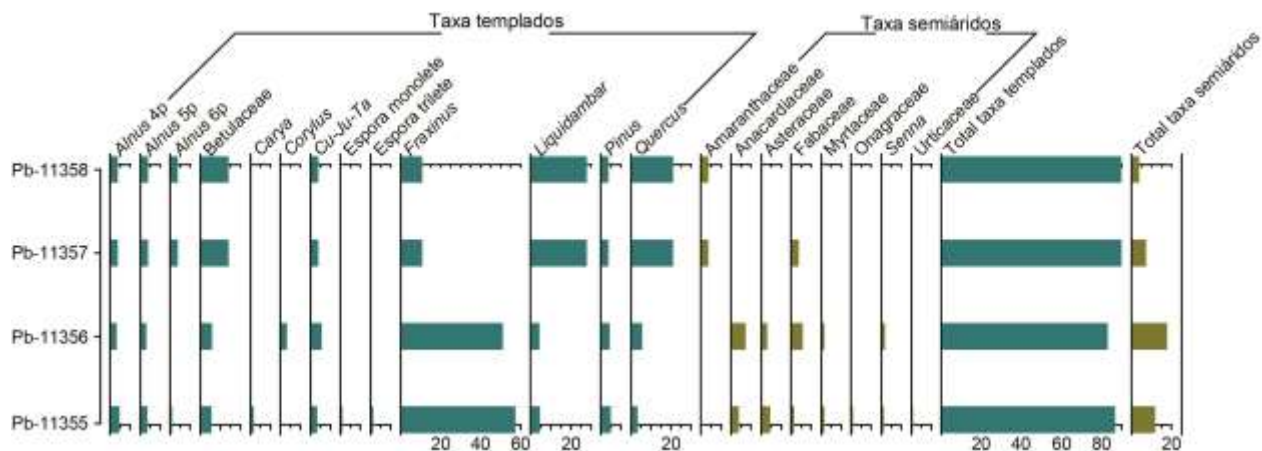


Figura 3. Polen-esporas de climas templados y semiáridos recuperados de la sección FTB1 de la Fm. Tehuacán.

Por otro lado, un conjunto paleopalinológico similar fue recuperado de cuatro muestras analizadas en la base de la sección FTB2 en donde se encontraron bien representados elementos templados recuperados también en la sección FTB1 y mencionados con anterioridad, así como polen de *Momipites*, *Corylus* y *Ostrya*, asimismo

granos de polen esporádicos de elementos indicativos de ecosistemas semiáridos locales como Agavaceae, Amaranthaceae, Asteraceae, *Bursera*, Liliaceae y *Selaginella* (Figura 5).



Figura 4. Granos de polen de vegetación templada recuperados de rocas carbonatadas de la base de la Formación Tehuacán, Puebla, secciones FTB1 y FTB2: A) *Pinus*; B, C) *Liquidambar*; D, I) *Alnus*; E, F) *Betula*; G, H) *Fraxinus*; N, O) *Quercus*. Algunos elementos semiáridos de la selva baja caducifolia obtenidos de las secciones FTB1 y FTB2: J, K) Anacardiaceae; L, M) Onagraceae; P) Gramineae; Q) Liliaceae; R) Fabaceae; S,T) *Bursera*; U,V) Amaranthaceae; W) Asteraceae.

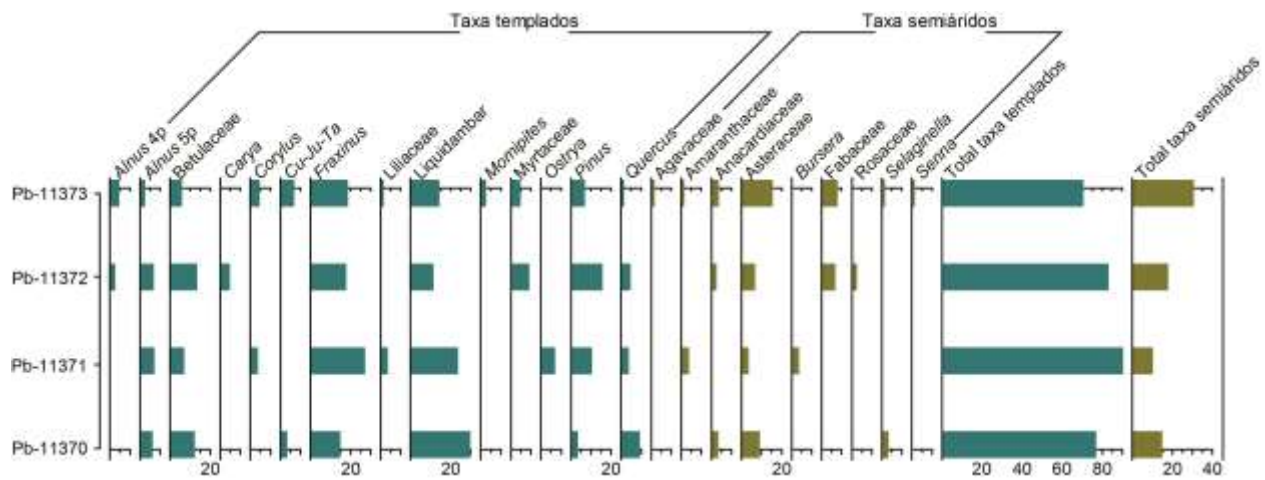


Figura 5. Polen-esporas de climas templados y semiáridos recuperados de la sección FTB2 de la Fm. Tehuacán.

Es importante destacar, que los registros obtenidos de las rocas carbonatadas de la base difieren considerablemente de aquellos recuperados del techo de la Fm. Tehuacán del Mioceno Medio mencionado con anterioridad ^[4], en donde se presenta gran diversidad de taxa de la selva baja caducifolia, así como del matorral xerófilo.

5. Conclusiones

Los espectros paleopalinológicos recuperados sugieren la presencia de elementos de vegetación templada a nivel regional, probablemente bosque mesófilo de montaña. Mientras que a nivel local se evidencia la presencia de elementos de la selva baja caducifolia, aun cuando se observa cierta riqueza, no existe abundancia de algún elemento en particular. Por lo tanto, es posible que las asociaciones analizadas de la

base de la Formación Tehuacán, por su composición diferente, comparadas con las estudiadas del techo de la unidad, sean más antiguas, probablemente correspondientes al Mioceno Inferior, indicativas de un clima más afín a temperaturas un poco más bajas que las correspondientes al óptimo climático del Mioceno Medio [6].

6. Bibliografía

1. Centeno-García E., Evolución estructural de la falla de Oaxaca durante el Cenozoico Inferior en Tehuacán, Puebla, Nota técnica: Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, V.10(3), 78-82 (1988).
2. Nieto-Samaniego A. F., Alaniz-Álvarez S. A., Ortega-Gutiérrez F., Estructura interna de la falla de Oaxaca (México) e influencia de las anisotropías litológicas durante su actividad cenozoica, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, V.12, 1-8 (1995).
3. Dávalos-Álvarez O. G., Nieto-Samaniego A. F., Alaniz-Álvarez S. A., Martínez-Hernández E., Ramírez-Arriaga E., Estratigrafía cenozoica de la región de Tehuacán y su relación con el sector norte de la falla de Oaxaca, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas V. 24, 197–215 (2007).
4. Ramírez-Arriaga E., Prámparo M. B., Nieto-Samaniego A.F., Martínez-Hernández E., Valiente-Banuet A., Macías-Romo C., Dávalos-Álvarez O. G., Palynological evidence for Middle Miocene vegetation in the Tehuacán Formation of Puebla, Mexico, Palynology, V. 38 (1), 1-27 (2014).
5. Rosales-Torres S., Ramírez-Arriaga E., Martínez-Bernal A., Zarate-Hernández M. R., Valiente-Banuet A., Márquez-García A. Z. Palinoflora del Plioceno-Pleistoceno recuperada de los travertinos Villa Alegría y Cerro Prieto en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, V. 34(2), 114-137 (2017).
6. Zachos J., Pagani M., Sloan L., Thomas E., Billups K., Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present, Science V. 292, 686–693 (2001).

Análisis comparativo del espectro polínico de mieles producidas por *Melipona beecheii* en Yucatán y Campeche, México.

Ramírez-Arriaga, E. ¹, Luna-Rodríguez, L. ², Xolalpa-Aroche, A. ³, Canto, A. ⁴ y Porter-Bolland, L. ⁵

¹ Departamento de Paleontología. Laboratorio de Palinología: Paleopalinología y Actuopalinología, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Cd. Mx., México. elia@unam.mx

² Departamento de Biología de la Reproducción. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Unidad Iztapalapa. abejas.nativas.uam@gmail.com

³ Centro de Innovación para el Desarrollo Apícola Sustentable. Universidad Intercultural Maya de Quintana Roo, México. aurora.xolalpa@uimqroo.edu.mx

⁴ Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (CICY). azucanto@cicy.mx

⁵ Ecología Funcional, Instituto de Ecología A.C. (INECOL). luciana.porter@inecol.mx

1. Resumen

Los estudios melisopalinológicos dan información sustancial sobre las estrategias de recolecta de recursos nectaríferos, poliníferos y néctar-poliníferos de abejas nativas. Además, permiten analizar en qué medida los métodos de extracción llegan a enriquecer el contenido polínico de mieles de meliponinos en diferentes regiones de México. El objetivo del presente trabajo es aportar conocimiento sobre los conjuntos palinológicos de mieles producidas por la abeja maya *Melipona beecheii* en Yucatán y Campeche, así como la cantidad absoluta de granos de polen por gramo de miel. Un total de 17 muestras de miel de *M. beecheii* fueron colectadas, todas fueron acetolizadas y se analizaron palinológicamente. Las 10 mieles de Yucatán mostraron una riqueza de 36 taxa pertenecientes a 17 familias de plantas, mientras que las siete muestras de Campeche registraron 31 especies incluidas en 18 familias de angiospermas. Los mismos elementos arbóreos (*Bursera simaruba* y *Cochlospermum vitifolium*) y arbustivos (*Gymnopodium floribundum*, *Mimosa bahamensis* y *Senna racemosa*) fueron importantes en los espectros polínicos de las mieles de ambos estados; además explicaron la máxima varianza entre las muestras; en las mieles dominaron especies exclusivamente poliníferas. La concentración de granos de polen evidenció que el 53% de las mieles de *M. beecheii* corresponden a mieles prensadas extremadamente ricas en polen, sugiriendo que algunas características como el grado de fermentación y acidez podrían verse modificadas.

2. Introducción

La abeja maya *Melipona beecheii* es la principal abeja sin aguijón o meliponino cultivada actualmente en la península de Yucatán ^[1] ^[2]. Si bien en las últimas décadas se ha incrementado el cultivo de abejas sin aguijón en dicha región ^[2], también es evidente que el cambio en el uso de suelo, así como la explotación de diversos recursos naturales y la modificación del clima han ocasionado la alteración de las comunidades vegetales, así como la pérdida de su biodiversidad ^[3]. Lo anterior afecta directamente a las poblaciones de abejas nativas y por ende al desarrollo de esta actividad ancestral o meliponicultura. Por otro lado, resulta primordial conocer y comprender los recursos de interés trófico para las abejas, ya que, a partir de una gran diversidad de plantas, las abejas sin aguijón elaboran la miel, la cual ha sido considerada curativa en la medicina tradicional ^[4].

En este sentido, estudios melisopalinológicos nos dan información sustancial sobre las estrategias de recolecta de recursos nectaríferos, poliníferos y néctar-poliníferos en diferentes épocas del año ^[5] ^[6]. Por otro lado, no solo nos ayudan a entender sus preferencias tróficas, sino su

comportamiento en el almacenamiento de recursos en los potes de miel y de polen ^[7]. Adicionalmente, el análisis palinológico permite analizar en qué medida, los métodos de extracción llegan a enriquecer el contenido polínico de mieles de meliponinos en diferentes regiones de México ^[8].

Dado que la Península de Yucatán es conocida por ser la región principal productora de miel de la abeja introducida *Apis mellifera* en México, nuestro interés es ahora aportar conocimiento sobre los conjuntos palinológicos de mieles producidas por la abeja maya *M. beecheii* en Campeche y Yucatán, con la finalidad de comparar palinológicamente si existen diferencias o similitudes relacionadas con la flora de interés nectarífero, polínifero y néctar-polinífero. Finalmente, el presente trabajo de investigación forma parte del proyecto CONACYT 321293 “*Fortalecimiento de los circuitos justos producción-consumo de los productos de la colmena de las abejas nativas*”, el cual predende documentar el enriquecimiento polínico de dichas mieles y contribuir al consumo de este recurso natural tanpreciado desde épocas precolombinas.

3. Condiciones experimentales

En el presente trabajo se colectaron un total de 17 muestras de miel de *Melipona beecheii*, siete del estado de Campeche y 10 de Yucatán. Todas las mieles fueron acetolizadas ^[9]. El proceso químico consistió en diluir 50 ml de miel en agua destilada caliente y concentrar los granos de polen por centrifugación a 1200 rpm. Posteriormente se agregó una pastilla con esporas marcadoras de *Lycopodium*, la cual fue diluida con ácido clorhídrico al 10% y se procedió a deshidratar la muestra con ácido acético glacial. Después, la mezcla acetolítica fue preparada con anhídrido acético y ácido sulfúrico en proporción 9:1 y el proceso de acetólisis se realizó en baño María a 70°C durante 14 minutos. Finalmente, una vez lavada la muestra hasta neutralizar se elaboraron laminillas permanentes utilizando gelatina glicerina como medio de montaje y fueron selladas con barniz de uñas transparente e incorporadas a la colección palinológica de polen moderno del Laboratorio de Palinología: Paleopalínología y Actuopalínología del IGI de la UNAM. Cabe mencionar que las esporas de *Lycopodium* permitieron calcular la cantidad absoluta de granos de polen por gramo de miel.

Los análisis melisopalínológicos fueron realizados con objetivo 100X en un fotomicroscopio Axiolab Zeiss y las micrografías fueron obtenidas con el programa AxioVisión. Una vez realizadas las descripciones palinológicas se llevaron a cabo las determinaciones de los tipos polínicos por comparación con la colección de referencia y catálogos palinológicos ^[5] ^[10]. Además, se realizó el conteo de 500 granos de polen al azar y se calcularon los porcentajes de cada taxón. Considerando la biología floral de los taxa abundantes en las mieles, se documentó si dichas plantas son consideradas recursos políniferos, nectaríferos o néctar-poliníferos. Las gráficas de los conjuntos palinológicos fueron realizadas con el programa Tilia Graph. Adicionalmente se incluyen datos sobre riqueza, y cantidad absoluta de granos de polen por gramo de miel ^[11]. Por último, se realizó un análisis de PCA con el programa Past.

4. Resultados y discusión

Los análisis melisopalinológicos realizados a las 10 mieles colectadas en Yucatán mostraron una riqueza de 36 taxa pertenecientes a 17 familias de plantas. Las familias mejor representadas fueron Burseraceae, Polygonaceae, Fabaceae, Euphorbiaceae, Bixaceae y Rhamnaceae. Mientras que en el caso de las siete muestras de Campeche se registraron 31 especies incluidas en 18 familias botánicas, destacando Fabaceae, Bixaceae, Burseraceae y Polygonaceae (Figura 1).

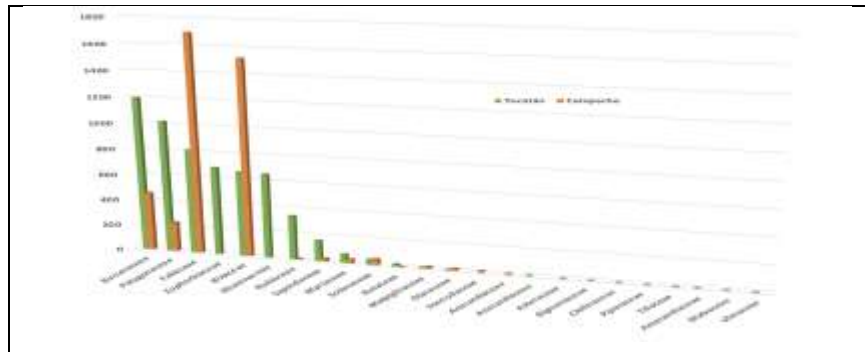


Figura 1. Cantidad total de granos de polen registrados por familia en los espectros de mieles de *Melipona beecheii* en Yucatán (verde) y Campeche (naranja).

En relación a los estratos donde *M. beecheii* recolectó sus recursos, se observó que la abeja maya prefiere los mismos elementos arbóreos y arbustivos en Yucatán y Campeche. En este sentido, del estrato arbóreo fueron importantes *Bursera simaruba* y *Cochlospermum vitifolium*, mientras que en el estrato arbustivo dominaron *Gymnopodium floribundum*, *Mimosa bahamensis* y *Senna racemosa* (Figuras 2 y 3). Las herbáceas y lianas fueron de menor importancia.

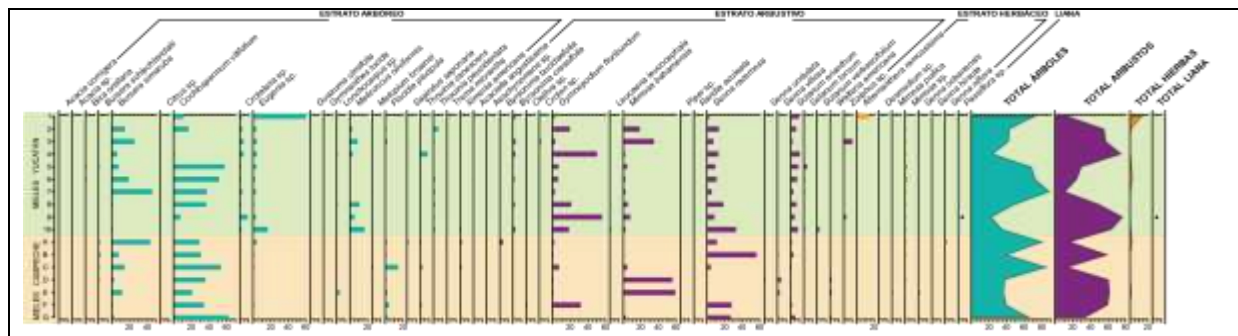


Figura 2. Espectro melisopalinológico de muestras de miel de *Melipona beecheii* producidas en los estados de Yucatán (1-10) y Campeche (A-G), México.

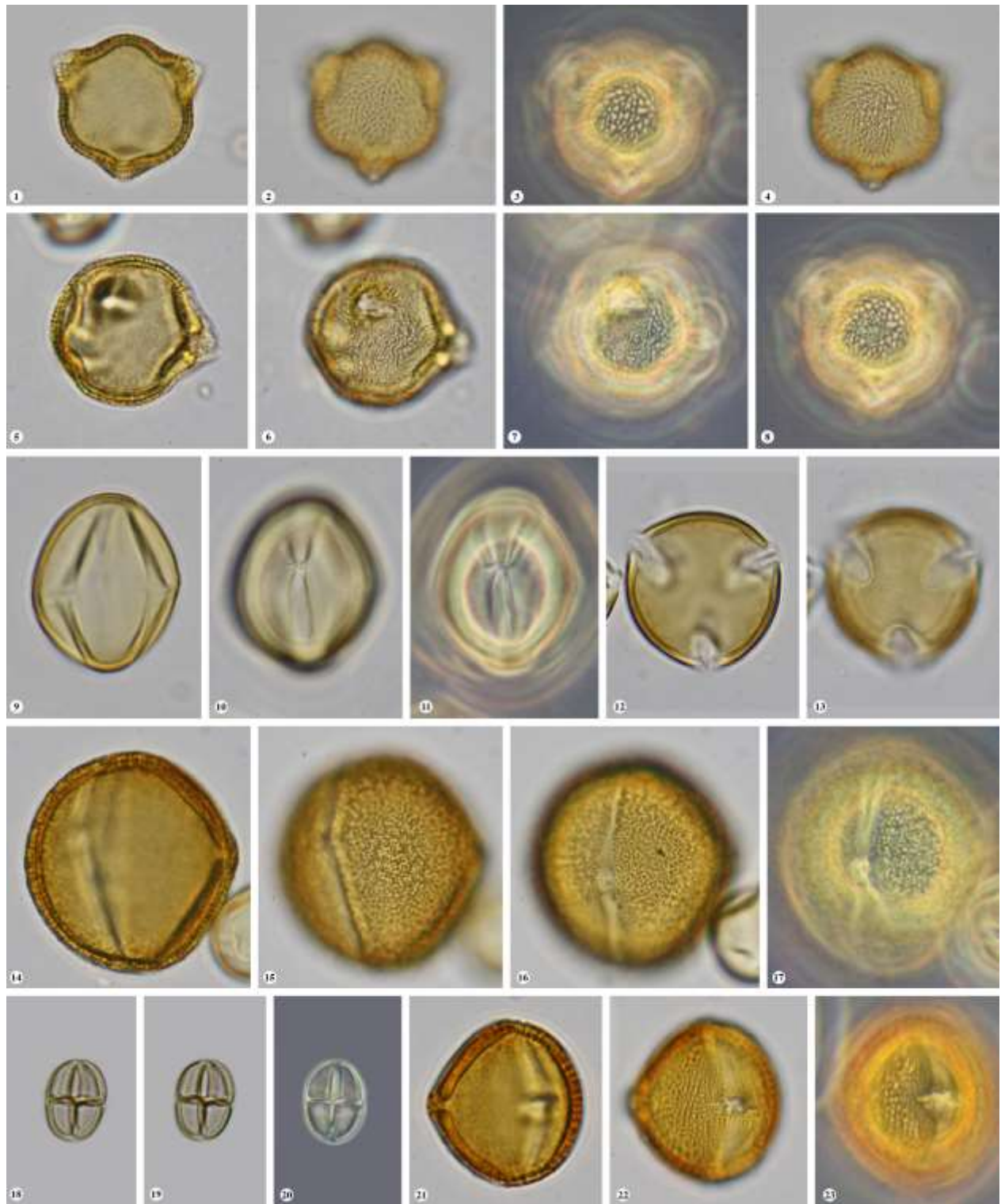


Figura 3. Granos de polen recuperados de mieles de *Melipona beecheii* producidas en Yucatán y Campeche. 1-8 *Bursera simaruba*; 9-13 *Senna racemosa*; 14-17 *Gymnopodium floribundum*; 18-20 *Mimosa bahamensis*; 21-23 *Metopium brownei*.

Cabe destacar, que varios elementos observados en los conjuntos palinológicos de Yucatán y Campeche son exclusivamente poliníferos como *C. vitifolium*, *M. bahamensis*, *M. pudica*, *Mimosa* sp., *S. racemosa*, *S. undulata*, *S. villosa* y todas las especies de la familia Solanaceae (*S. erianthum*, *S. torvum* y *S. verbascifolium*). Es importante recalcar que en el caso de las especies de *Senna* y *Solanum*, las abejas recolectan el polen por vibración o “buzz pollination” [12]. La polinización por vibración llevada a cabo por meliponinos facilita la producción de frutos más grandes y con mayor número de semillas [13] (Wongsa et al., 2023).

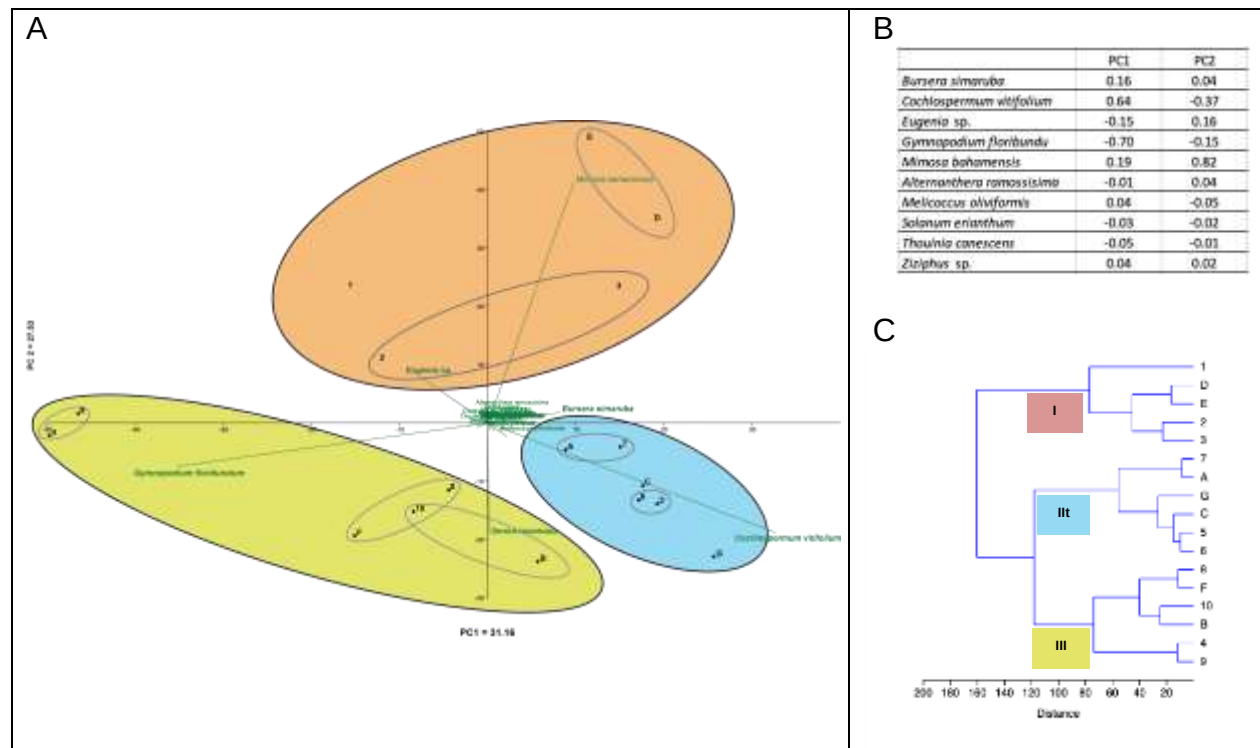


Figura 4. Análisis PCA aplicado a muestras de miel de Campeche (1-10) y Yucatán (A-G): **A.** Gráfico PCA donde se consideran los componentes PC1 y PC2. **B.** Especies que explican la máxima varianza entre las muestras. **C.** Análisis de agrupamiento.

Por otro lado, se realizó un análisis PCA, el cual evidenció que los dos primeros componentes explican el 58.69% de la varianza entre las muestras de miel (PC= 31.16% y PC2= 27.53%). Asimismo, las especies que explican la máxima variación entre las mieles fueron *B. simaruba*, *C. vitifolium*, *Eugenia* sp., *G. floribundum* y *M. bahamensis*. Otras especies que definen en menor grado la varianza son *Alternanthera ramossissima*, *Melicoccus oliviformis*, *S. erianthum*, *Thouinia canescens* y *Ziziphus* sp. (Figura 4). En general, el análisis de componentes principales (PCA) así como un análisis de conglomerado o cluster, ayudaron a entender que, con base en el contenido polínico, las mieles de ambos estados, llegan a tener elementos importantes similares, por lo que las muestras se agrupan en el mismo grupo (Figura 4C: I, II y III). Lo anterior podría estar directamente relacionado con la vegetación circundante a los meliponarios, es decir, con la disposición y abundancia de los recursos preferidos por *M. beecheii* en Campeche y Yucatán. Así, en el cluster I donde se agruparon las muestras 1-3 de Yucatán, así como la D y E de Campeche destacan *M. bahamensis* así como *Eugenia* sp.; en el conglomerado II donde se agrupan las mieles 5-7 así como las mieles A, C y G, el elemento importante es *C. vitifolium*; y en el grupo III que concentra el resto de las muestras, se observan cercanamente relacionadas las muestras 8 y F, así como la 10 y la B por *S. racemosa*, así como las mieles 4 y 9 por *G. floribundum* (Figuras 4A y 4C).

Finalmente, en lo que respecta a la cantidad absoluta de granos de polen por gramo de miel, un total de ocho muestras: seis de Yucatán y dos de Campeche fueron clasificadas en el grupo III que corresponde a mieles ricas en polen. Además, dos muestras de Yucatán fueron catalogadas como mieles extremadamente ricas en polen/ mieles prensadas (IV). Mieles que fueron sometidas a prensado, es decir, los potes de miel fueron comprimidos junto con potes de polen, lo que permitió que dichas mieles fueran extremadamente ricas en su contenido de granos de polen (V) fueron dos muestras de Yucatán y cinco de Campeche (Figura 5).

MUESTRA	EN 10g MIEL	GRUPO
1	464090.1	II
2	272412.3	II
3	5550191.3	V
4	507533.9	IV
5	266392.1	II
6	494154.8	II
7	342515.3	II
8	1177111.6	V
9	256114.6	IV
10	177155.8	II
A	1339495.6	V
B	1486704.0	V
C	1454797.6	V
D	1770990.4	V
E	1537718.4	V
F	283291.3	II
G	336125.6	II

Grupo I	30 000 en 10g	Miel con poco polen
Grupo II	de 20 000 a 100 000	Miel con polen
Grupo III	de 100 000 a 500 000	Miel rica en polen
Grupo IV	de 500 000 a 1 000 000	Miel extremadamente rica en polen/ miel prensada
Grupo V	más de 1 000 000	Miel prensada extremadamente rica en polen

Figura 5. Clasificación de las mieles recolectadas en Yucatán (1-10) y Campeche (A-G) de acuerdo a la cantidad absoluta de granos de polen por 10 gramos de miel.

La mezcla de recursos polínicos (potes de polen) con recursos nectaríferos y néctar-poliníferos (potes de miel) puede ser corroborada también por la presencia de taxa exclusivamente poliníferos muy abundantes en los espectros polínicos mencionados con anterioridad. Estas plantas poliníferas proveen, como su nombre lo indica, exclusivamente polen, carecen de nectarios florales, así que su alta frecuencia indica que se trata de mieles que han sido prensadas durante los métodos de extracción. Lo anterior debe ser considerado cuando se venden dichas mieles, ya que, por un lado, se está adicionando proteína, y por otro, es muy probable que algunas características de las mieles lleguen a modificarse, como las relacionadas con la fermentación y el grado de acidez. Estudios palinológicos donde se ha documentado también el enriquecimiento polínico de mieles de *Scaptotrigona mexicana* debido a los métodos de extracción se han realizado en el estado de Veracruz [8].

5. Conclusiones

En Yucatán y Campeche, la abeja maya *M. beecheii* colecta sus recursos preferentemente de los árboles *Bursera simaruba* y *Cochlospermum vitifolium*, mientras que del estrato arbustivo prefiere las especies *Gymnopodium floribundum*, *Mimosa bahamensis* y *Senna racemosa*. Los elementos dominantes explicaron la máxima varianza entre las muestras, cabe destacar que algunos de ellos son exclusivamente poliníferos. Además, el 53% de las muestras indicaron que son mieles prensadas extremadamente ricas en polen, lo que sugiere que ciertas características podrían incrementarse como la fermentación y acidez, lo que podría ser de interés comercial o para los consumidores.

6. Bibliografía

1. González-Acereto J. A, Quezada-Euán J. J. G, Medina-Medina L. A. New perspectives for stingless beekeeping in the Yucatan: results of an integral program to rescue and promote the activity. *J Apic Res* 45, 234–239 (2006).
2. Quezada-Euán J. J. G. The past, present, and future of meliponiculture in Mexico. In Quezada-Euán J. J. G. (ed) *Stingless bees of Mexico: the biology, management and conservation of an ancient heritage*, 1st ed. Springer International Publishing, Switzerland, pp 243–269 (2018).

3. Jaureguiberry P., Titeux N., Wiemers M., Bowler D. E., Luca Coscieme, Golden A.S., Guerra C. A., Jacob U., Takahashi Y., Settele J., Díaz S., Molnár Z., Purvis A., The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science Advances*, 8, eabm9982, 11pp (2022).
4. González-Acereto J. A. , De Araujo-Freitas Ch., González-Freyre J., Los productos de las abejas nativas, la salud, la vida y la magia: Elementos asociados en la realidad comunitaria entre los campesinos mayas de la península de Yucatán. pp. 18–22. *Memorias del VII Seminario Mesoamericano sobre Abejas Nativas*. Cuetzalan, Puebla, México. 242 pp. (2011).
5. Martínez-Hernández E., Cuadriello-Aguilar J. I., Téllez- Valdez O., Ramírez-Arriaga E., Sosa-Nájera M. S., Melchor-Sánchez J. E., Mediana-Camacho M., Lozano-García M.S., Atlas de las plantas y el polen utilizados por las cinco especies principales de abejas productoras de miel en la región del Tacaná, Chiapas, México. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México; México D.F., México. 105 pp. (1993).
6. Ramírez-Arriaga E., Pacheco-Palomo K. G., Moguel-Ordoñez Y. B., Zepeda García Moreno R., Godínez-García L. M., “Angiosperm Resources for Stingless Bees (Apidae, Meliponini): A Pot-Pollen Melittopalynological Study in the Gulf of Mexico” in *Pot-Pollen in Stingless Bee Melittology*, Springer International Publishing, pp. 111–130 (2018).
7. Bacab-Pérez A. I., Ramírez-Arriaga E., Canto A., Melissopalynology of pot-pollen and pot-honey of the Mayan stingless bee *Melipona beecheii* Bennett, 1831 (Apidae, Meliponini) in Yucatan, Mexico. *Apidologie* **55**, 22 (2024).
8. Ramírez-Arriaga E., Porter-Bolland L., Ruiz de la Merced F., Luna-Rodríguez L., Espectro palinológico y cantidad absoluta de polen de mieles de *Scaptotrigona mexicana* (Apinae, Meliponini) reflejan los métodos de extracción. 29º Congreso Internacional de Actualización Apícola. Haciendo historia en la Apicultura. ANMVEA. Centro de Convenciones Tlaxcala, Tlaxcala. Memorias, p. 69-76 (2023).
9. Erdtman G., The acetolysis method, a revised description. *Sven Bot Tidskr* 54:561–564 (1960)
10. Palacios-Chávez R., Ludlow-Wiechers B., Villanueva-Gutiérrez R., Flora palinológica de la reserva de la biosfera de Sian Ka'an, Quintana Roo, México. CiQRO, Chetumal-Quintana Roo, (1991).
11. Louveaux J., Maurizio A., Vorwohl G., Methods of melissopalynology, *Bee World* 59:139–157, (1978).
12. Vallejo-Marín M., Buzz pollination: studying bee vibrations on flowers. *New Phytologist* 224: 1068-1074 (2019).
13. Wonga K., Duangphakdee O., Rattanawanee A., Pollination efficacy of stingless bees, *Tetragonula pagdeni* Schwarz (Apidae: Meliponini), on greenhouse tomatoes (*Solanum lycopersicum* Linnaeus). *PeerJ* 11:e15367 DOI 10.7717/peerj.15367 (2023).

Percepciones sobre bienestar animal en estudiantes universitarios de agronomía: resultados e implicaciones para la ganadería sostenible

González-Miranda, J. A.¹; Valverde, A. ²; Sevilla-Benavides, F. ³

¹Maestrando en Gerencia Agroempresarial, Universidad de Costa Rica, San José,

jose.gonzalezmiranda@ucr.ac.cr

²Doctor en Ciencias Biológicas, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Alajuela,
anvalverde@tec.ac.cr

³Doctorando en DOCINADE, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia, San Carlos, f.sevilla@itcr.ac.cr

1. Resumen

El objetivo del presente trabajo fue analizar las percepciones sobre el bienestar animal, presentes en estudiantes universitarios de agronomía y sus implicaciones para la ganadería sostenible desde una perspectiva interdisciplinaria. Se realizó una encuesta digital sobre bienestar animal entre estudiantes de agronomía del Instituto Tecnológico de Costa Rica la cual recopiló datos demográficos, creencias y actitudes. Se encontraron diferencias ($P < 0,05$) en las percepciones éticas según género y el nivel de educación. La mayoría de los participantes tenía experiencia con animales de producción, pero solo el 28,5% percibió un buen trato hacia estos animales, mientras que el 57,6% lo consideró regular. Las mujeres mostraron una mayor preocupación por el bienestar animal que los hombres, lo que sugiere la necesidad de integrar cursos específicos y experiencias prácticas sobre manejo animal ético en el currículo académico. Es necesario una formación integral en bienestar animal para preparar a futuros profesionales capaces de enfrentar los desafíos éticos y técnicos en la producción ganadera, además de proponer campañas de sensibilización y actualización profesional en el sector agropecuario.

2. Introducción

El manejo y la interacción que tienen los profesionales en agronomía con los animales de producción, está influenciada por sus experiencias previas y el aprendizaje técnico recibido durante la formación académica ^[1] por lo que comprender las percepciones y creencias que puedan tener sobre el bienestar animal durante su formación universitaria es importante para mejorar los programas de estudio, promover las buenas prácticas en el manejo animal y comprender las implicaciones del vínculo humano-animal ^[2].

La presencia de maltrato o de condiciones estresantes innecesarias en animales de producción, los cuales en ocasiones son utilizados para el entretenimiento humano (rodeos, cabalgatas, entre otros) genera preocupaciones éticas y emocionales entre los consumidores de productos de origen animal, siendo cada vez más cuestionado y considerado como un acto innecesario e inaceptable ^[3].

En el contexto agronómico donde la interacción humano-animal es común, comprender los procesos cognitivos de las personas en relación con el trato que brindan a los animales de producción es fundamental para promover prácticas de manejo animal más éticas, sostenibles y que generen confianza entre los consumidores. Esto es especialmente relevante en entornos universitarios como el Instituto Tecnológico de Costa Rica (Institución de educación superior en Costa Rica), donde los estudiantes de agronomía tienen una amplia exposición a la interacción con animales de producción en diversas situaciones educativas o recreativas, y además serán los profesionales que supervisarán los sistemas de producción animal en el futuro, lo que evidencia la importancia de una educación integral en bienestar animal para dotar a los estudiantes de conocimientos multidisciplinarios que les permitan abordar los desafíos éticos y técnicos en la producción ganadera ^[4].

El objetivo del presente trabajo fue analizar distintas percepciones del bienestar animal presentes en estudiantes costarricenses de la carrera de agronomía y sus implicaciones para la ganadería sostenible desde una perspectiva interdisciplinaria.

3. Metodología

Para indagar sobre lo anterior, se llevó a cabo una investigación cuantitativa con el fin de determinar las percepciones de los estudiantes universitarios de agronomía sobre el bienestar animal, utilizando una encuesta digital que recopiló información sobre aspectos demográficos, creencias, actitudes y posibles comportamientos, permitiendo analizarlos en función de estructuras de pensamiento que existen a nivel individual mediante la teoría psicológica basada en evidencia de los marcos relacionales.

Los datos para este estudio fueron obtenidos a través de una encuesta aplicada presencialmente a estudiantes de la Licenciatura en agronomía del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Campus Tecnológico Local San Carlos, como parte de una investigación exploratoria sobre sus actitudes, comportamientos y percepciones hacia el bienestar animal en la interacción con animales de producción. La muestra incluyó estudiantes matriculados en todos los cuartiles de la carrera, con datos recopilados entre junio y julio de 2023. Se empleó una ecuación para calcular el tamaño de la muestra, asegurando su representatividad a nivel de la población de los estudiantes de agronomía activos en el Campus.

Se recopiló información sobre aspectos sociodemográficos, generalidades sobre bienestar animal y dimensiones éticas relacionadas. Se diseñó el cuestionario siguiendo recomendaciones para mantener la simplicidad y claridad en las preguntas, con consulta de expertos previa a su aplicación. Se utilizaron escalas Likert de cinco puntos para medir las respuestas de los participantes, y se centró el análisis en aspectos como el uso de animales en actividades de entretenimiento y las percepciones éticas sobre estas prácticas.

Los datos fueron analizados mediante el *software* R ^[5], se realizaron pruebas estadísticas como la prueba de rango con signo de Wilcoxon y regresión logística ordinal, considerando factores demográficos como género, edad, avance en la carrera, antecedentes interactuando con animales en fincas, participación en actividades recreativas con animales (rodeo, topes, cabalgatas, entre otras) y sus creencias al respecto. La muestra fue de 144 personas encuestadas y se excluyeron del análisis aquellos participantes que no dieron su consentimiento o eran menores de 18 años.

4. Resultados y discusión

Los resultados de la encuesta indicaron que la mayoría de los participantes eran hombres (61,8%) y provenientes de entornos rurales (85,4%). La distribución por edades mostró un sesgo hacia rangos más jóvenes, con un 36,1% de los encuestados entre 18 y 20 años. Además, se observó una proporción equilibrada entre géneros en cuanto a la

finalización de la malla curricular, pero las mujeres predominaron en niveles iniciales y edades entre 18 y 23 años.

El análisis reveló que una parte significativa de los encuestados tenía experiencia previa con animales de producción (57,6%), pero, solo el 28,5% de encuestados consideró que los animales de granja eran tratados bien o muy bien, mientras que la mayoría (57,6%) los percibió como tratados de forma regular. Además, se identificó una gradación en la preocupación por el sufrimiento animal, con un incremento significativo en aquellos estudiantes más avanzados en la carrera. Además, el análisis de *odds ratio* reveló que las mujeres tenían una probabilidad 0,20 veces mayor de preocuparse por el sufrimiento animal que los hombres.

En términos éticos, la mayoría de los encuestados consideró que no es ético utilizar animales en actividades recreativas, deportivas o de caza. Sin embargo, hubo una discrepancia entre géneros, con un mayor porcentaje de hombres que consideraron ético el uso de animales en actividades recreativas como la pesca, los rodeos o las cabalgatas. Las mujeres mostraron una mayor predisposición a conceder derechos a los animales que los hombres, y esta tendencia se mantuvo incluso al considerar el avance en la carrera y el entorno geográfico de los encuestados.

Sobre la relación entre el bienestar animal y la actividad ganadera con fines exclusivamente productivos se propuso un modelo parabólico que sugiere que existe un punto óptimo de bienestar a la mitad de la productividad, más allá del cual el incremento en la producción puede disminuir el bienestar, llegando a condiciones de explotación máxima. Por lo tanto, es crucial buscar un equilibrio que optimice tanto las ganancias económicas como el bienestar animal para evitar deteriorar las condiciones de vida de los animales productivos, siendo que las actividades no productivas con animales (recreativas como el rodeo) no se justificarían a nivel técnico ^[6], lo que se demostró en los resultados obtenidos de la presente investigación, especialmente en estudiantes de agronomía del género femenino.

Se identificaron diferencias ($P < 0,05$) en las variables de preocupación por el maltrato animal generado en las actividades de la pesca y el rodeo entre los estudiantes

de agronomía que provenían de ambientes urbanos versus rurales, estos últimos presentaron una menor preocupación por las consecuencias del rodeo y la pesca para el bienestar de los animales involucrados. Además, hubo una menor preocupación por el bienestar de las plagas animales conforme se avanzaba en la malla curricular de la carrera.

Los estudiantes de agronomía, independientemente del género, presentaron una mayor preocupación por el bienestar animal específico de los caballos conforme avanzan en el nivel de la carrera y también conforme más experiencia tienen en fincas de producción animal, esta última variable de experiencia en fincas también se relacionó con la preocupación por el bienestar de las vacas de leche superior a la del ganado de carne.

El análisis estadístico de los resultados reveló asociaciones significativas entre las características demográficas de los participantes y sus perspectivas éticas sobre el bienestar animal. En particular, se identificaron diferencias de género en la percepción del trato actual de los sistemas productivos hacia los animales, así como diferencias basadas en el género y la educación para las preocupaciones y dilemas bioéticos. Estos hallazgos resaltan la complejidad individual y cultural que implican las creencias en el bienestar animal con las consecuencias materiales que pueden tener en el manejo que se le brinda a los animales y sus posibles afectaciones para los sistemas productivos que actualmente requieren cumplir con exigencias sociales, comerciales y legales en bienestar animal. La utilización de la Teoría de los Marcos Relacionales (RFT) proporcionó una lente teórica para comprender cómo los estudiantes desarrollan relaciones simbólicas complejas a nivel psicológico que dependen de la regularidad y los contextos de su interacción con diferentes animales, pues esta teoría postula que las personas son capaces de generar relaciones derivadas o "espontáneas" entre estímulos sin haberlas aprendido de manera explícita o directa, algo inherente al desarrollo cognitivo humano y que permea constantemente la manera en que las personas perciben y se relacionan con los animales no humanos.

Estos hallazgos resaltan la necesidad de promover una sensibilización continua sobre el bienestar animal y la ética en la utilización de animales en diferentes ámbitos,

incluyendo la formación universitaria en ciencias agropecuarias. Esto deriva en que el interés por el bienestar puede fundamentarse en un interés social genuino caracterizado por un mejor y mayor aprovechamiento de los recursos genéticos animales ^[7].

5. Conclusiones

La percepción sobre el trato a los animales de granja fue mayormente negativa, con solo un pequeño porcentaje considerando que son tratados bien o muy bien. Esta percepción podría estar influenciada por la limitada experiencia técnica donde se instruya en el manejo de animales de producción, especialmente en los primeros años de la carrera, donde predominan los cursos de ciencias básicas.

Existe una alta preocupación por el bienestar animal entre la población estudiantil, aunque con diferencias significativas entre géneros. Las mujeres mostraron una preocupación casi cinco veces mayor que los hombres, lo que coincide con investigaciones previas que sugieren que las mujeres tienden a tener mayores niveles de empatía hacia los animales. Además, se observó una gradación en la percepción del sufrimiento animal conforme los estudiantes avanzan en la carrera, lo que resalta la importancia de una formación integral en ética y bienestar animal a lo largo del programa educativo.

6. Recomendaciones

Se debe adaptar los programas educativos a las necesidades actuales y formar profesionales del sector agroalimentario con una sólida ética hacia la producción animal sostenible.

Dado que los estudiantes de Agronomía muestran una creciente sensibilidad hacia el bienestar animal, se recomienda integrar cursos específicos sobre el tema en el plan de estudios de las universidades que oferten carreras relacionadas con la ciencia animal.

Además, es fundamental complementar la formación teórica con experiencias prácticas en manejo animal ético desde los primeros cursos de producción animal.

Se deben ofrecer espacios de actualización profesional sobre aspectos técnicos y éticos en el manejo de animales durante todo el ciclo productivo con el fin de minimizar el maltrato.

Es importante el desarrollo de actividades de extensión, mediante campañas de divulgación del bienestar animal dirigidas a la comunidad estudiantil y a la población en general, especialmente cuando se desarrollen actividades recreativas que involucren animales de producción, ya sean rodeos criollos o profesionales, topes y cabalgatas, o cualquier otro tipo de entretenimiento con animales.

Se recomienda a los ganaderos adoptar prácticas de producción que tomen en cuenta el bienestar animal y la sostenibilidad. Esto implica proporcionar un ambiente adecuado y condiciones de vida que satisfagan las necesidades naturales de los animales.

6. Referencias

1. Sullivan, P., Davis, M., Smith, C. L., Delmore, R., Román-Muñiz, N., Cramer, C., Stallones, L., & Edwards-Callaway, L. (2022). A preliminary exploration of the impact of experiential learning on animal science undergraduates' perceptions of humane stunning and slaughter. *Translational Animal Science*, 6(3), Article txac108. <https://doi.org/10.1093/TAS/TXAC108>
2. Clark, B., Stewart, G. B., Panzone, L. A., Kyriazakis, I., & Frewer, L. J. (2016). A systematic review of public attitudes, perceptions and behaviours towards production diseases associated with farm animal welfare. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 29(3), 455-478. <https://doi.org/10.1007/S10806-016-9615-X/TABLES/1>
3. Fraser, D. (2012). A «Practical» Ethic for Animals. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 25(5), 721-746. <https://doi.org/10.1007/S10806-011-9353-Z>
4. Valverde, A., González-Miranda, J.A., Sevilla, F., Mora, S., Roldan, R. S., Vargas, C., y González, R. 2024. "Perceptions of Animal Welfare on Livestock: Evidence from College

- Agronomy Students in Costa Rica" Animals 14, no. 10: 1398.
<https://doi.org/10.3390/ani14101398>
5. R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
 6. Temple, D., y Manteca, X. (2020). Animal welfare in extensive production systems is still an area of concern. Frontiers in Sustainable Food Systems, 4(1).
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.545902/full>
 7. Del Campo Gigena, M. (2009). El bienestar animal y la calidad de carne de novillos en Uruguay con diferentes sistemas de terminación y manejo previo a la faena. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia]. Riunet. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/4326>

Ruta panorámica de conexión Escuinapa - Teacapán - Novillero

Antonio, A. D.¹, Reyes, H. A.², Castillo, D.³, Sánchez, M. A.⁴, Dávila, J. A.⁵,

¹⁻⁵ UAM - Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

aledan19.20@gmail.com, hirambreyesp@hotmail.com, davcastill@gmail.com,
marcos19981962@gmail.com, jadg@azc.uam.mx.

1. Resumen

Se proyecta una ruta para mejorar la movilidad entre Escuinapa de Hidalgo al Novillero uniendo las carreteras 15Fed y 15D, Mazatlán a Tepic, a partir de extender la carretera estatal Sin-01 hasta la carretera estatal Nay-68 (Playa de Novillero –Tecuala, con las carreteras indicadas). Se propone y ubica un puente sobre el estuario de Teacapán que une a esta población, última en la carretera estatal y rica en recursos naturales para el turismo y el bienestar económico y social, con la red de carreteras del sector sur del estuario, en Nayarit, compartiendo los beneficios mutuos que derivan. El puente y la integración de los productos de ambas regiones se podrán hacer realidad mediante un costo de no más de 300 millones de pesos proporcionados por partes iguales en un plazo de completamiento de 24 a 36 meses mediante un esquema público - privado de financiamiento administrado por ambos Estados.

2. Introducción

La ruta proyecta la movilidad de la zona turística de Mazatlán, generando una mayor derrama económica al ofrecer alternativas a turistas nacionales e internacionales que gustan de playas y de lugares inexplorados. Reduce el traslado actual en una tercera parte, en promedio; beneficia la economía del norte de Nayarit y sur de Sinaloa al contar con una ruta de conexión directa entre sus localidades ahora aisladas, acercando a distintas poblaciones no menos importantes, lo que genera conexión y comunicación entre ellas.

Proporciona una extensión a los turistas que visitan las playas ubicadas en Teacapán en el sur de Sinaloa -cuyas playas están catalogadas como de las más bellas del Estado-, ahora destino turístico no tan reconocido. La ruta estudiada culmina con la conexión a la playa Novillero, que cuenta con un récord Guinness de extensión de arenas doradas, clima agradable, oleaje tranquilo y un nivel de marea estable que permite caminar, con seguridad, cien metros mar adentro. Figuras 1 y 2.



FIGURAS 1 Y 2. Estuario de Teacapán y Playa Novillero

En la Figura 3 se puede observar la falta de comunicación vial en la zona de interés, por lo que la infraestructura propuesta en este manuscrito proporciona una alternativa factible, promoviendo a su vez un flujo económico en la zona comprendida por las localidades de Teacapán, San Cayetano, Playa Novillero y alrededores, proyectando un crecimiento económico -con la llegada de mayor flujo de turismo al lugar-, control y gestión adecuada del suelo, difusión de zonas eco-turísticas, atrayendo nueva inversión pública y privada, llegada de servicios básicos -luz, agua potable, drenaje, etc-, actividades en zonas marítimas tales como esnórquel, surf, buceo, pesca, entre muchas otras.

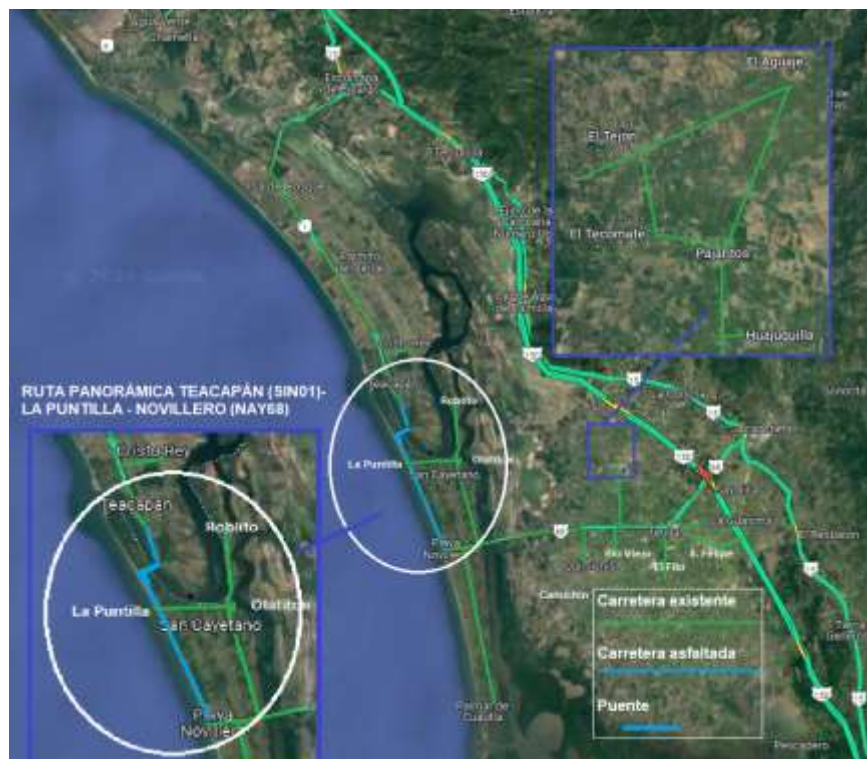


Fig. 3. Red carretera existente (verde) y propuesta para completamiento (azul)

3. Turismo, Medio Ambiente Y Economía

3.1-Turismo: Apertura y promoción del desarrollo de nuevas zonas de interés como el poblado de La Puntilla y dándole mayor visibilidad a las playas locales. También tendrán mayor auge los comercios locales como el famoso embarcadero “Otatitos”, las ruinas de la hacienda de San Cayetano, los conchales de la cultura Totorame y el poblado de El Roblito. También se busca expandir la cultura local culinaria que se basa en los mariscos, pescados, ostiones y callo de hacha propios de la región¹.

3.2-Desarrollo de proyectos ecoturísticos en la zona de La Puntilla.

Implementación de campañas publicitarias para promover el turismo a la zona de Teacapán y Novillero, en zonas como el aeropuerto internacional y la terminal de autobuses de Mazatlán, así como en los de Guadalajara y Nayarit.

Desarrollo de actividades de ocio en las playas de Teacapán, San Cayetano y la Puntilla.

Se pretende impulsar la inversión de empresas públicas y privadas en materia de infraestructura y alimentación, con la llegada de nuevos servicios, de tal manera que resulte atractivo para turistas nacionales y extranjeros.

3.3-Medio ambiente: Se reducirán las emisiones de CO₂ al medio ambiente debido a la disminución de las distancias recorridas acortando los tiempos de traslado. Se dará mayor cuidado y visibilidad a las zonas de manglares por la vigilancia a la que serán expuestos, así como a proyectos que ayuden al cuidado de estos. Cuidado de las especies animales existentes, desde caimanes hasta peces y aves propias de la región del estuario.

Gestión adecuada del uso del suelo, promoviendo el desarrollo ordenado de la infraestructura de la localidad del novillero, así como del poblado de La Puntilla y sus alrededores, procurando una correcta relación entre el desarrollo y la conservación del medio ambiente.

Con la proyección de nueva infraestructura se busca darle visibilidad con las medidas ambientales respectivas a las amenazas que tiene el manglar, como: pérdida de vegetación original, cacería ilegal e introducción de especies exóticas, contaminación por agroquímicos y desechos de granjas camaronícolas, y se respeta el proyecto en donde se contempla la construcción de presas para incrementar la superficie de riego para agricultura de temporal².

3.4-Economía: Con el incremento en el flujo de productos locales, tales como artesanías, conservas, frutos tropicales, así como la variedad de cultivos, pescado, camarón y ostras, en general, se pretende un mayor intercambio y derrama económica. También se prevé el incremento en el número de

empleos formales que permitan la permanencia de los pobladores, así como la posible llegada de nuevos habitantes propiciando un repoblamiento ordenado.

Crecimiento en el número de empleos con la llegada de nueva infraestructura como servicio de gasolineras, hoteles, cadenas comerciales, ventas y alquiler de casas por aplicación, etc.

Apertura de nuevas rutas de transporte de pasajeros entre Teacapán y Tecuala que beneficia directamente a todos los poblados aledaños, así como la apertura de nueva ruta para el trasiego de productos agrícolas y ganaderos de diversas localidades.

4. Estrategia proyectual

4.1-Puente.

La zona objetivo para la construcción del puente se define en la ilustración #2, se seleccionó de esta forma por la cercanía al poblado de Teacapán y el tipo de terreno, además, se cuenta con caminos ya establecidos en la cercanía que conectan directamente con el poblado anteriormente mencionado. De igual forma, en el estuario podemos encontrar bancos de arena que fungirán como protección a las bases del puente, dejando libre el paso en las zonas ondas para el libre flujo del agua y para el posible tránsito en lanchas. La longitud aproximada del puente está sobre los 600 metros, dependiendo de la zona de construcción y una altura promedio de 5 a 10 metros. El puente culminará en el lado de Nayarit, cerca del poblado de La Puntilla.



Ilustración 4. Zona de interés para la construcción del puente

4.2-Carretera (La Puntilla - Novillero)

Del lado de Sinaloa en el poblado de Teacapán se acondicionarán un aproximado de 3 kilómetros de carretera que unirá el puente con las vías existentes y a su vez con el centro del poblado. Del lado de Nayarit, se requiere la construcción de 5 kilómetros de carretera del puente al poblado de La Puntilla y de este punto y hasta la Playa del Novillero, se requiere del acondicionamiento y

reacondicionamiento de un aproximado de 12 kilómetros de camino, lo que contempla la vía existente de terracería y el adecuamiento de esta. Al entronque con el Novillero se diseñará y promoverá la construcción de un distribuidor vial que evite los percances viales y atascos futuros.

La ruta trazada permitirá promover la construcción de atractivos turísticos y ecoturísticos en la zona de La Puntilla, incluyendo a las cooperativas y ejidatarios locales, con el propósito de desarrollar la zona como un lugar recreativo en pro del medio ambiente y de aprovechamiento económico. Del mismo modo, se incrementará el tránsito en los negocios locales que promueven los recorridos en lancha por el estuario y den a conocer las zonas de manglares.

4.3-Ordenamiento territorial y planes de desarrollo de los poblados acorde al auge esperado.

Actualmente en la zona que contempla a La Puntilla y el Novillero, se está llevando a cabo un crecimiento poblacional y de infraestructura, sin embargo, esto se está dando de forma desordenada y sin regulación alguna acorde a los recursos naturales y especies nativas del lugar, lo cual genera un panorama desolador ante el crecimiento descontrolado de la infraestructura local. Bien coordinado, atraerá inversión a proyectos de servicios tales como gasolineras y comercios varios que no se encuentran actualmente en la región.

4.4-Planes de protección del medioambiente.

Dándole mayor visibilidad a los recursos naturales de la zona y generando un mayor conocimiento sobre la importancia de la conservación de estos en la población local, se impulsarán proyectos que beneficien el cuidado del medio ambiente con la promoción de campañas de recuperación de las zonas de manglares, así como la preservación de las especies nativas³.



Ilustración 5 y 6. Zona de manglares en el estuario (entre Sinaloa y Nayarit)

4.5-Promoción de las zonas turísticas (playas existentes).

Si bien actualmente la zona presenta un enorme potencial turístico, la falta de caminos y conectividad directa impiden aprovechar sus amplias posibilidades ante la relativa poca llegada de turistas a la zona por la dificultad que ello representa; es importante mencionar que tanto las playas de Teacapán

como del Novillero son reconocidas por su belleza. Este proyecto, dará apoyo a los espacios turísticos actuales para que mejoren su actividad y prácticas acorde al giro que desempeñan preparándose ante la llegada de más turismo a la zona.

4.6-Construcción del boulevard La Puntilla - Playa del Novillero y distribuidores viales.

La interconexión Teacapán - La Puntilla - Novillero permitirá fomentar la construcción de un amplio boulevard que realce la vista panorámica de la larga Playa del Novillero al permitir que esa calzada pueda partir desde el extremo norte del Novillero hasta la zona de Palmar de Cuautla, aprovechando el trazo del camino existente en la actualidad. Establecer glorietas de distribución a lo largo del mismo deberá ser proyectado en el futuro tomando en consideración las posibilidades de las zonas de marismas y lagunares de la región, en particular de la desembocadura de ríos y afluencia de canales del estuario de Teacapán, que podrá identificarse como Ría Oeste (también denominada Barra o Canal de Cuautla). Encontrar nuevas vías a través del estuario, de la ría descendente y del Canal de Palmar de Cuautla, en su complejidad, permitirá abonar el futuro de la región con la explotación de sus inmensos recursos de fauna y de flora endémica.

La vialidad a partir de la Puntilla permitirá también resaltar el valor de la actual interconexión con Otatitos, el Puente del Arrastradero, el poblado de El Roblito así como su eventual llegada al Cúmulo de Conchas de la Cultura Totorame y dejar en exploración nuevas rutas hacia las carreteras 15Fed y 15D en la zona de Palmillas - Ojo de Agua, en Sinaloa y en los límites de Nayarit en el Río de las Cañas. Justamente, teniendo al paso el poblado de San Cayetano y los vestigios de su Hacienda - que remonta a la época colonial-, converge con la ruta, asfaltada, que lleva al sur, diez kilómetros después, al poblado de la comunidad de El Novillero, unos kilómetros al oeste de la Playa del mismo nombre.

5. Obra en marcha - Financiamiento

Para este proyecto se prevé como piedra angular la construcción, al final de la ruta Sin-01 en Teacapán de un puente que atraviese el estuario en una zona que permita hacerlo de manera segura y fiable, como se muestra en la figura 4 siguiente. Este puente, junto con su extensión carretera de entrada, permitirá crear las condiciones suficientes para la conectividad de la zona indicada. El puente se estima de una longitud total de 600 metros sobre el Estuario y en la dirección ortogonal hacia la región del brazo norte de la zona de la Puntilla. Un kilómetro de vía carretera después se unirá al Boulevard en trazo y seguirá hacia el sur bordeando la Playa en los diez a quince kilómetros siguientes, misma que tendrá posibilidad de unirse a la actual carretera asfaltada de San Cayetano a la comunidad del Novillero (Ejido) para, a su entronque, remontar a la zona de la Playa y del otro lado, alejarse en dirección Tecuala y la red carretera de esa región.

Para su construcción, se calcula que el puente del lado del Estado de Sinaloa costará los 150 millones de pesos a valor actual y por su parte, el acondicionamiento de veinticinco kilómetros de carreteras del lado del Estado de Nayarit, otro tanto. Así pues, el financiamiento para la obra en esta etapa para tres años se espera pueda ser objeto de trabajo del Presupuesto Federal de Egresos contemplado en los ramos de programación para los Estados y Municipios #23 y demás.

Se propone la posibilidad de impulsar la búsqueda de un financiamiento bancario de fondos de retiro tanto nacionales como internacionales como la vía factible de acceso a recursos que no exijan el uso de recursos públicos salvo para aquellos casos contemplados en los programas existentes de inversión o mantenimiento de los Estados y Municipios.

Para el caso del puente se considera imprescindible el uso de este tipo de recursos para lo cual se ha calculado, empleando valores de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público para el uso de intereses TIIE (11% anual), y de banco acreditado en México para el sobre porcentaje respectivo empleado en julio 2024 (+2.5%). Para el caso del acondicionamiento terrestre de carreteras existentes y nuevas, se podrá explorar la posibilidad de utilizar los recursos públicos existentes y en dominio actual para los dos o tres años siguientes al inicio del proyecto. En su caso, puede utilizarse el mismo esquema de prioridades respecto al financiamiento del puente.

La tabla III, en anexo, muestra los resultados de la simulación que, sobre el valor total del financiamiento para el puente, fueron obtenidos, tanto para el primer año, como para los demás dentro de un valor máximo de treinta años, empleando la depreciación de la infraestructura legal indicado por la Ley del ISR del SAT (art. 34). Con el cálculo a valor presente, esto permitirá explorar los valores a futuro si fuese así el caso, es decir, de una administración dinámica en función del tiempo.

5.1. Resultados y discusión

El diseño propuesto de la ruta de conexión con la construcción del puente sobre el estuario generará una disminución en distancias y tiempos como se muestra en la tabla comparativa a continuación:

TABLA 5 TABLA DE RESULTADOS

Recorrido	Novillero- Teacapán	Novillero - Escuinapa	Mazatlan - Novillero	Escuinapa - Novillero	Aeropuerto - Novillero	Tecuala – Teacapán
Actual	130 km	93	190 km	100	180	80
Ruta de conexión	25 km	60	160 km	60	135	70
Comparación en tiempo (%)	19.23	63.16	84.21	60	75	82.35

Considerando el promedio aritmético de la disminución de las distancias del cuadro anterior, se tiene una media, al 65.4% de reducción, tanto en la distancia como en el tiempo promedio. Las proyecciones

iniciales contemplan el aumento del turismo nacional a la zona del Novillero y de Teacapán en un 50%, con la apertura de la ruta, y además, se estima el incremento del turismo internacional en un 200% para ambas zonas.

Por su parte, la simulación del flujo vehicular y su costo puede observarse para dos esquemas diferentes de préstamo bancario y depreciación respecto al número de pasos vehiculares promedios diarios en ambos sentidos del puente, a costos del orden de \$ 20.72 pesos MXN a valor presente para dos mil usos vehiculares.

|

TABLA 6 TABLA II. COSTO UNITARIO A VALOR PRESENTE DEL PASO VEHICULAR DIARIO

Costo diario promedio MXN			Costo diario promedio MXN, vida útil		
\$150 MMXN	Pasos /dia	MXN	\$150 MMXN	Pasos/día	MXN
90234.59	100	902.35	55638.91	100	556.39
	500	180.47		500	111.28
	1000	90.23		1000	55.64
	2000	45.12		2000	27.82
	4000	22.56		4000	13.91
	6000	15.04		6000	9.27
	10000	9.02		10000	5.56

6. Conclusiones

Puente viable. Del análisis de la propuesta, sus beneficios y desafíos involucrados, se puede concluir que formalizar un puente sobre el Estuario de Teacapán traerá múltiples beneficios a la localidad, al Estado y a la región en su conjunto. De igual manera, abrir una ruta de movilidad permanente entre el Novillero y Escuinapa además de la ruta contraria, de Teacapán a Tecuala y Acaponeta permitirá completar la red carretera ideal para el desarrollo de la zona.

Del lado Nayarit, la interconexión de sus caminos y carreteras es importante para su viabilidad como región económica, turística y ecológica. Formular y completar trazos viables de carreteras con servicios propios a esas vialidades como estaciones de distribución de gasolinas y de gas para empleo doméstico, así como estaciones de recargado de pilas para vehículos eléctricos en el corto y mediano plazos.

Para acceder al alcance de los objetivos en el corto y mediano plazos, debe emplearse la estrategia proyectual indicada anteriormente, en particular, mientras se construye el puente de Teacapán, se deben adecuar las carreteras que permitirán unir la red carretera de la zona del Novillero, la Puntilla y Teacapán.

7. Bibliografía

1. Las referencias deben indicarse dentro del texto principal como superíndice encerradas en corchetes ^[1] y ser numeradas consecutivamente en el orden que sean referidas.
2. Orgaz Agüera, Francisco, & Moral Cuadra, Salvador. (2016). El turismo como motor potencial para el desarrollo económico de zonas fronterizas en vías de desarrollo. Un estudio de caso. *El periplo sustentable*, (31), 00008. Recuperado en 13 de agosto de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-90362016000200008&lng=es&tlng=es.
3. Velázquez-Pérez, Carolina, Tovilla-Hernández, Cristian, Romero-Berny, Emilio I., & Jesús-Navarrete, Alberto De. (2019). Estructura del manglar y su influencia en el almacén de carbono en la Reserva La Encrucijada, Chiapas, México. *Madera y bosques*, 25(3), e2531885. Epub 15 de mayo de 2020. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531885>
4. Municipio de Tecuala (2020). Plan de desarrollo municipal 2020.
5. J. I., A. Ruiz-Luna, M. Guzmán-Arroyo, F. González-Farías, J. Acosta-Velázquez y A. D. VázquezLule. Caracterización del sitio de manglar Teacapán – Agua Brava – Marismas Nacionales, Sinaloa - Nayarit, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2009. Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, CDMX. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/manglares/doctos/caracterizacion/PN10_Teacapan_Agua_Brava_Marismas_Nacionales_caracterizacion.pdf. Consultado el 4 de septiembre del 2023.
6. Municipio de Acaponeta (2022). Plan de desarrollo municipal 2022.

ANEXO. FINANCIAMIENTO BANCARIO.

TABLA 7 FINANCIAMIENTO ANUAL DURANTE LA VIGENCIA DE DEPRECIACIÓN DEL PUENTE.

Año efectivo	Años, préstamo, con gracia	MM(MXN) (150 C. I., 30y), 3 gracia, ministracion anual (const)	Prima de capital (27)	Capital + Interés	Capital promedio	Interés pagado	Ct+Interés	Cap remanente
1	-3	50	0	6.750000	56.750000	0	0	
2	-2	50	0	14.411250	121.161250	0	0	
3	-1	50	0	23.106769	194.268019	0	0	
4	1	194.2680188	7.19511181	187.072907	190.670463	25.74051248	32.9356243	187.0729069
5	2	187.0729069	7.19511181	179.877795	183.475351	24.76917239	31.9642842	179.8777951
6	3	179.8777951	7.19511181	172.682683	176.280239	23.79783230	30.9929441	172.6826833
7	4	172.6826833	7.19511181	165.487572	169.085127	22.82649220	30.021604	165.4875715
8	5	165.4875715	7.19511181	158.29246	161.890016	21.85515211	29.0502639	158.292460
9	6	158.2924597	7.19511181	151.097348	154.694904	20.88381202	28.0789238	151.0973479
10	7	151.0973479	7.19511181	143.902236	147.499792	19.91247192	27.1075837	143.9022361
11	8	143.9022361	7.19511181	136.707124	140.30468	18.94113183	26.1362436	136.7071243
12	9	136.7071243	7.19511181	129.512013	133.109568	17.96979173	25.1649035	129.5120125
13	10	129.5120125	7.19511181	122.316901	125.914457	16.99845164	24.1935634	122.3169007
14	11	122.3169007	7.19511181	115.121789	118.719345	16.02711155	23.2222234	115.1217889
15	12	115.1217889	7.19511181	107.926677	111.524233	15.05577145	22.2508833	107.9266771
16	13	107.9266771	7.19511181	100.731565	104.329121	14.08443136	21.2795432	100.7315653
17	14	100.7315653	7.19511181	93.5364535	97.1340094	13.11309127	20.3082031	93.53645347
18	15	93.53645347	7.19511181	86.3413417	89.9388976	12.14175117	19.336863	86.34134167
19	16	86.34134167	7.19511181	79.1462299	82.7437858	11.17041108	18.3655229	79.14622986
20	17	79.14622986	7.19511181	71.9511181	75.548674	10.19907098	17.3941828	71.95111806
21	18	71.95111806	7.19511181	64.7560062	68.3535622	9.22773089	16.4228427	64.75600625
22	19	64.75600625	7.19511181	57.5608944	61.1584503	8.25639080	15.4515026	57.56089444
23	20	57.56089444	7.19511181	50.3657826	53.9633385	7.28505070	14.4801625	50.36578264
24	21	50.36578264	7.19511181	43.1706708	46.7682267	6.31371061	13.5088224	43.17067083
25	22	43.17067083	7.19511181	35.975559	39.5731149	5.34237052	12.5374823	35.97555903
26	23	35.97555903	7.19511181	28.7804472	32.3780031	4.37103042	11.5661422	28.78044722
27	24	28.78044722	7.19511181	21.5853354	25.1828913	3.39969033	10.5948021	21.58533542
28	25	21.58533542	7.19511181	14.3902236	17.9877795	2.42835023	9.62346204	14.39022361
29	26	14.39022361	7.19511181	7.19511181	10.7926677	1.45701014	8.65212195	7.195111806
30	27	7.195111806	7.19511181	0	3.5975559	0.48567005	7.68078185	0
			194.268019	2569.75226	2994.79752	354.053464	548.321483	2525.484244

Sistema de autenticación para exámenes en línea con IoT

Vega Luna, J.I.¹, Salgado Guzmán, G.¹, Cosme Aceves J.F.¹, Sánchez Rangel, F.J.¹, Rodríguez Tapia, V.G.¹, Andrade González, E.A.², Reyes Ayala, M.²

¹Área de Sistemas Digitales, ²Área de Comunicaciones, Departamento de Electrónica,
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

vlji@azc.uam.mx, gsg@azc.uam.mx, cajf@azc.uam.mx, fjsr@azc.uam.mx,
vgtr@azc.uam.mx, eaag@azc.uam.mx, mra@azc.uam.mx

1. Resumen

La autenticación de estudiantes en línea juega un papel importante en los centros de estudio e instituciones académicas. El reconocimiento facial es una de las principales formas de autenticación de personas. El objeto de estudio de este trabajo fue hacer una investigación formal para determinar la posibilidad de implantar un sistema de autenticación de estudiantes en la aplicación de exámenes en línea usando una plataforma de Internet de las Cosas. En la primera parte de esta investigación se abordan los puntos que proporcionan los fundamentos para el desarrollo de ésta. En la segunda parte se presentan los temas necesarios para la investigación, los resultados obtenidos y el análisis de éstos. En la tercera se indican los resultados y conclusiones obtenidos.

2. Introducción

En la actualidad, es necesario evaluar y controlar remotamente exámenes académicos en línea para disminuir al máximo el contacto entre personas. Al realizar estos exámenes puede haber suplantación. Durante los últimos años, en las instituciones educativas, empresas y organismos de certificación ha crecido significativamente la cantidad de exámenes aplicados en línea ^[1]. Esto ha permitido lograr mayor productividad y eficiencia, sin embargo, han surgido problemas serios a los cuales se han enfrentado estas entidades. Uno de los principales es la suplantación de identidad en los exámenes en línea. Consiste en que una persona presente el examen asumiendo la identidad del estudiante o persona examinada intercambiando información propia de ésta última. Las consecuencias son éticas y legales, afectando a las instituciones de educación y disminuyendo la confianza de los alumnos en ellas ^[2]. Ante esta situación, existen algunas acciones que pueden usarse para evitar este fraude académico. Una es mediante la autenticación del estudiante, la cual usa técnicas de reconocimiento facial y verificación de la identidad empleando la fotografía de su identificación oficial. Otra forma es mediante supervisión remota, en la cual se supervisa al estudiante usando software de monitoreo o a través de la evaluación de resultados, en la cual se detectan patrones de comportamiento sospechosos en los exámenes que permitan ubicar un caso de suplantación de identidad ^[3].

Cuando se realiza la autenticación del alumno antes de realizar el examen por medio de reconocimiento facial, puede robustecerse la solución usando una plataforma de Internet de las Cosas (IoT-Internet of Things) ^[4]. La IoT es la integración de sensores, módulos embebidos, computación y tecnologías de comunicación que permite que objetos y actuadores intercambien información para automatizar tareas, actuando con nula o poca intervención humana ^[5].

Al realizar una revisión sobre los trabajos e investigaciones realizadas en los últimos años, referente al control de autenticación en equipo de cómputo ^[6], se encontró que la tendencia es usar métodos biométricos cada vez más sofisticados, basados en parámetros como la huella digital ^[7], el reconocimiento facial ^[8], ^[9] y el análisis de la firma con redes neuronales profundas iterativas ^[10], entre otras técnicas. Existe una cantidad importante de investigaciones que tratan el tema de los mecanismos de autenticación ^[11], sin embargo, no se ha realizado una aplicación similar a la aquí presentada utilizada en autenticación para exámenes en línea, ya que gran parte de su funcionalidad es innovadora.

Para diseñar y desarrollar un sistema de autenticación de alumnos, por medio de reconocimiento facial para exámenes en línea, es importante considerar los aspectos que se abordan a continuación ^[12]. En la actualidad, realizar una aplicación de IoT puede ser una tarea difícil considerando que existe disponibilidad de una cantidad grande tanto de opciones y herramientas de software y hardware como de plataformas en la nube ^[13], ^[14]. No obstante, existen plataformas que permiten el uso de módulos embebidos que simplifican el diseño de este tipo de aplicaciones reduciendo el tiempo y complejidad de la implantación ^[15]. Una de ellas es Blynk, la cual es una de las plataformas de IoT más usadas hoy en día por su fácil configuración y uso ^[16]. Está basada en una aplicación que se ejecuta en un dispositivo móvil con sistema operativo iOS o Android, permitiendo controlar el hardware conectado a la Internet, así como visualizar y almacenar información enviada por sensores y dispositivos remotos ^[17].

La plataforma Blynk está compuesta por tres elementos: 1- la aplicación o App, desde la cual se pueden crear proyectos usando íconos o widgets disponibles en ella, 2- el servidor, cuya función es el manejo de las comunicaciones entre el dispositivo móvil y el hardware. El servidor es de código abierto y se encuentra en la nube de Blynk y 3- las bibliotecas de Blynk, las que permiten la comunicación del hardware con el servidor y la ejecución de las acciones en el hardware. El panel de control de Blynk soporta una variedad de módulos embebidos entre los que se encuentran: Arduino, Raspberry, ESP8266 y ESP32, entre otras ^[18]. El método para configurar y usar la App de Blynk consiste en tres fases. En la primera se crea el proyecto, donde se asigna el nombre de éste, se especifica el módulo embebido a usar, el tipo de conexión a la Internet y se genera la clave de autorización que utilizará el módulo con el servidor. La segunda fase consiste en crear la interface gráfica de usuario o panel de control usando la forma arrastrar y soltar. Radica en seleccionar widgets que formarán el panel de control del proyecto. Los widgets son de diferente tipo, entre los que se encuentran botones, deslizadores y gráficos ^[19]. Es necesario indicar las propiedades y características de los widgets las que incluyen: el nombre, el número y tipo de terminal del módulo embebido asociada, que puede ser analógica o digital, y el color. Una vez configurada la App, es necesario realizar la programación del módulo embebido para ejecutarla y llevar a cabo la comunicación con el servidor de Blynk ^[20].

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema que permita controlar remotamente, desde la Internet, la autenticación para realizar exámenes en línea, para evitar la suplantación, utilizando un dispositivo electrónico digital, el cual cuenta con una cámara integrada, y una plataforma de IoT. El propósito fue proporcionar el acceso a estudiantes que previamente han sido autorizados a ingresar a la plataforma del examen. El sistema usa la plataforma Blynk y el módulo embebido ESP32 CAM. La contribución del trabajo es que constituye una solución tecnológica basada en herramientas de hardware y software de reciente creación y código libre, así como una plataforma de IoT, lo cual representa una aplicación de bajo costo, rápida y eficiente que puede extenderse en evaluaciones de distintos tipos.

3. Condiciones experimentales

El método de trabajo que se siguió para obtener la información adecuada y suficiente para desarrollar el sistema se estructuró en cuatro niveles ^[21].

Nivel 1.- Este nivel cubre lo relacionado con el acceso directo al hardware del módulo ESP32CAM, incluyendo la programación para la interacción a bajo nivel con los sensores y actuadores.

Nivel 2.- En este nivel se ubica el algoritmo para reconocimiento de imágenes. Utilizando este algoritmo se identifica el rostro de la imagen capturada por la cámara integrada del módulo ESP32CAM. Una vez identificada la imagen se compara con las imágenes almacenadas en una base de datos.

Nivel 3.- En este nivel se obtuvo la información para realizar la programación en la plataforma Blynk, la cual será la interface de usuario y desde donde se autenticará al estudiante que presentará la evaluación.

Nivel 4.- Este nivel se ocupa de la conexión inalámbrica WiFi entre el módulo de captura de imágenes y la interface de usuario.

El proceso para el desarrollo del sistema se dividió en tres etapas: a- la captura de la imagen del rostro, por medio de la cámara integrada del módulo ESP32CAM, en formato JPEG, b- el procesamiento de la imagen. El algoritmo de reconocimiento de la imagen capturada, implantado en el módulo ESP32CAM, convierte el archivo JPEG, por medio de una función de la biblioteca de funciones OpenCV, a una escala de grises y realiza la detección del rostro y c- intenta reconocer el rostro, usando otra función de la biblioteca de OpenCV, comparando la imagen con la de rostros almacenados en una base de datos, intenta autenticar al estudiante. El módulo ESP32CAM se conectó a la red WiFi para acceder a la Internet y acceder al servidor de la plataforma Blynk, con el objetivo de autenticar al estudiante desde la aplicación de Blynk instalada en un teléfono móvil o una computadora ^[22]. En la Figura 1 se muestra el diagrama de bloques funcionales del sistema.

3.1 Características del módulo ESP32CAM.

El ESP32-CAM, como el mostrado en la Figura 2, es un módulo de tamaño pequeño que cuenta con una cámara de 27 X 40.5 X 4.5 milímetros, 2 Megapíxeles y consume una corriente máxima de 6 mA. El módulo ESP-32CAM se puede utilizar ampliamente en varias aplicaciones de IoT. Es adecuado para dispositivos inteligentes domésticos, control inalámbrico industrial, monitoreo inalámbrico, identificación inalámbrica QR, sistemas de posicionamiento inalámbrico y otras aplicaciones.

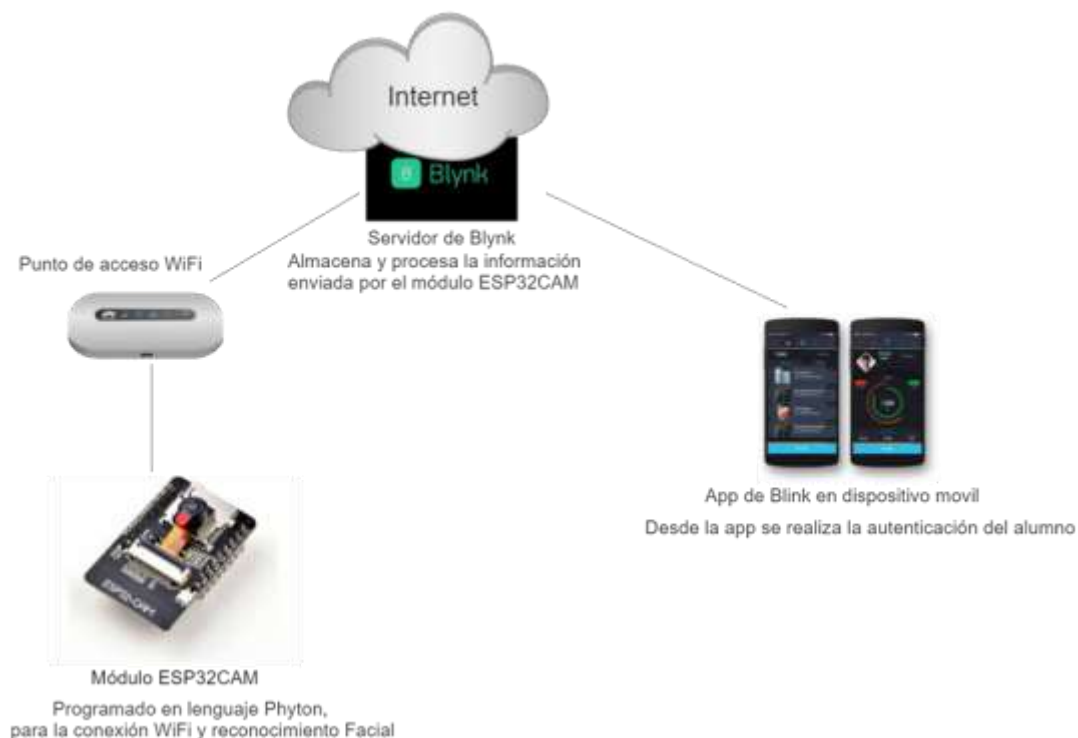


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema

3.2 Recursos del módulo ESP32CAM.

El módulo ESP32CAM es un Sistema en Chip (SoC-System on Chip), basado en un controlador de bajo consumo de corriente que admite WiFi de 2.4 GHz y Bluetooth Low Energy (BLE). El controlador es de doble núcleo de 32 bits, como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 3.

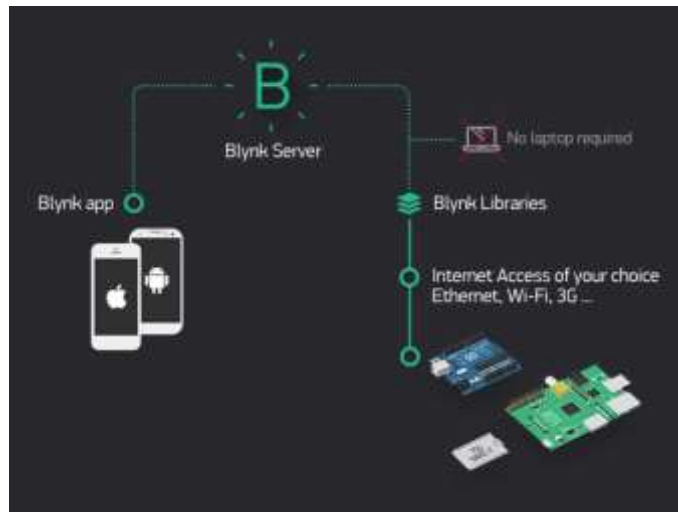


Figura 4. Funcionamiento de la plataforma Blynk

Crear un proyecto nuevo. Una vez que se ha iniciado una sesión en la cuenta, se procede a crear un proyecto nuevo, como se indica en la Figura 6.

Elegir el hardware. Se debe seleccionar el tipo del hardware a usar como se indica en la Figura 7.

Token de autenticación o Auth Token. El Auth Token es un identificador único que se necesita para conectar el hardware al teléfono inteligente. Cada proyecto creado tendrá un token de autenticación. Se recibirá el token de autenticación automáticamente en el correo electrónico después de la creación del proyecto, aunque puede copiarse manualmente al crear el proyecto. A continuación, se debe seleccionar el dispositivo a utilizar, como se indica en la Figura 8.

Adicionar un widget. Es necesario adicionar un botón para controlar el dispositivo, lo cual se realiza en la interface para abrir el cuadro de widgets, como se indica en la Figura 9. Posteriormente, se deben configurar las terminales de entrada/salida. La lista de terminales refleja las terminales físicas definidas por el hardware. Por ejemplo, si un dispositivo está conectado a la terminal digital 8, se debe seleccionar la terminal D8, como se aprecia en la Figura 10.

Ejecutar el proyecto. Cuando se ha terminado con la configuración, se debe presionar el botón REPRODUCIR, donde se podrá interactuar con el hardware. Si se desea adicionar nuevos widgets, presionar DETENER y retornar al modo EDITAR, como se indica en la Figura 11.

3.5 Algoritmo para la programación del módulo ESP32CAM: conexión WiFi y el reconocimiento facial.

El algoritmo para la programación del módulo ESP32CAM se basó en el diagrama de flujo indicado en la Figura 12 y se implantó en Python.



Figura 5.
Funcionamiento de la
plataforma Blynk

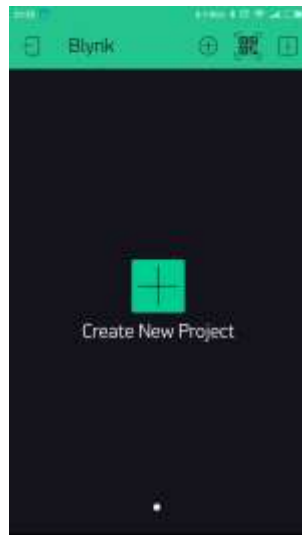


Figura 6. Creación de un
proyecto nuevo



Figura 7. Elección del
hardware



Figura 8. Token de
autenticación

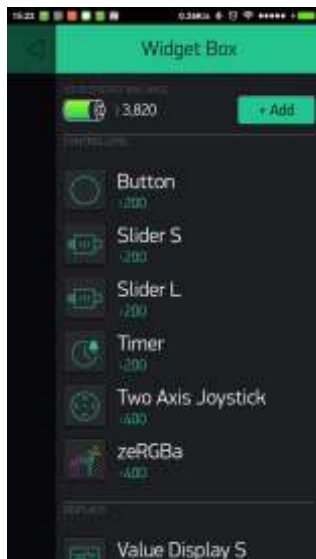


Figura 9. Adicionar un widget



Figura 10. Configuración de las
terminales



Figura 11. Ejecución del
proyecto

3.6 Lenguaje de programación Python.

Python es un lenguaje de programación que permite trabajar rápidamente e integrar sistemas de manera más efectiva. Es un software de código abierto, eficiente, en el cual los usuarios pueden contribuir con código y documentación para corregir errores y adicionar funciones. Python fomenta la participación de la comunidad en la mejora del software.

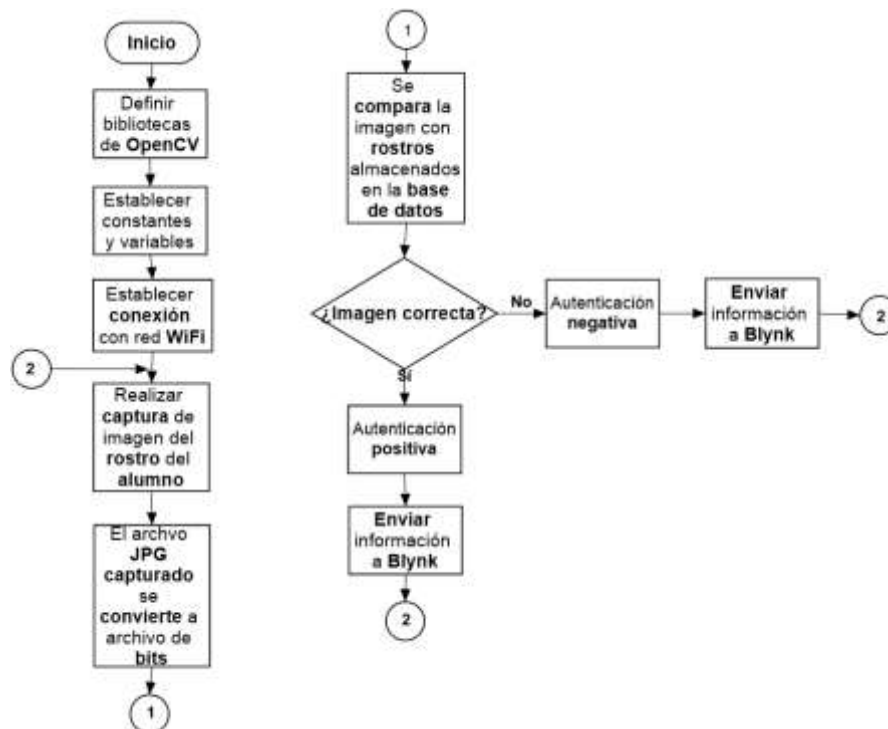


Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo usado en la programación

Python cuenta con estructuras de datos de alto nivel eficientes y un enfoque simple y efectivo para la programación orientada a objetos. Es ideal para la creación de scripts y desarrollo rápido de aplicaciones en diferentes áreas en la mayoría de las plataformas. El intérprete de Python y una extensa cantidad de bibliotecas son de uso libre y están disponibles para las plataformas principales de hardware desde el sitio web de Python. El mismo sitio también contiene distribuciones y referencias a una cantidad grande de módulos, programas y herramientas de Python de terceros, gratuitos y documentación adicional. El intérprete de Python se puede ampliar fácilmente con nuevas funciones y tipos de datos implementados en C o C ++.

3.7 El intérprete de Python.

El intérprete de Python generalmente se instala en la ruta `/usr/local/bin/python3.10`. En computadoras con sistema operativo Linux es posible iniciarlo ejecutando el comando `python3.10`. En computadoras con Windows en las que haya instalado Python desde Microsoft Store, está disponible el comando `python3.10`. Las funciones de edición de línea del intérprete incluyen modo interactivo, sustitución de historial y finalización de código en sistemas que admiten la biblioteca GNU Readline.

Modo interactivo. Cuando los comandos se leen desde una terminal, el intérprete está en modo interactivo. En este modo, solicita el comando a ejecutar con el indicador principal, generalmente tres signos mayores que (`>>>`); para las líneas de continuación, lo solicita con el indicador secundario por

defecto: los tres puntos (...). El intérprete muestra un mensaje de bienvenida que indica la versión y un aviso de derechos de autor antes de mostrar el primer mensaje, como se indica en la Figura 13.

```
$ python3.10
Python 3.10 (default, June 4 2019, 09:25:04)
[GCC 4.8.2] on linux
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more
information.
>>>
```

Figura 13. El intérprete de Python

Codificación de código fuente. De forma predeterminada, los archivos fuente de Python se tratan como codificados en UTF-8 (8-bit Unicode Transformation Format). En esa codificación, los caracteres de la mayoría de los idiomas del mundo se pueden usar simultáneamente en literales de cadena, identificadores y comentarios, aunque la biblioteca estándar solo usa caracteres ASCII para identificadores, una convención que debe seguir cualquier código portátil. Para mostrar todos estos caracteres correctamente, el editor debe reconocer que el archivo es UTF-8 y debe usar una fuente que admita todos los caracteres del archivo.

Programación. En la Figura 14 se indica un ejemplo de la estructura general de un programa en Python.

```
>>> # Fibonacci series:
... # the sum of two elements defines the next
... a, b = 0, 1
>>> while a < 10:
...     print(a)
...     a, b = b, a+b
... 
```

Figura 14. Ejemplo de la estructura de un programa en Python

La primera línea contiene una asignación múltiple: las variables *a* y *b* obtienen simultáneamente los valores de 0 y 1, respectivamente. En la última línea, las expresiones del lado derecho se evalúan antes que las asignaciones. Las expresiones del lado derecho se evalúan de izquierda a derecha. El ciclo *while* se ejecuta mientras la condición *a < 10* sea verdadera. En Python, como en el lenguaje de programación C, cualquier valor entero distinto de cero es verdadero; cero es falso. La condición también puede ser una cadena o un valor de lista, de hecho, cualquier secuencia; cualquier cosa con una longitud distinta de cero es verdadera, las secuencias vacías son falsas. La prueba utilizada en el ejemplo anterior es una comparación simple. Los operadores de comparación estándar se escriben de la misma manera que en C: < (menor que), > (mayor que), == (igual a), <= (menor o igual que), >=

(mayor o igual que) y `!=` (no igual a). El cuerpo del bucle tiene sangría, mediante la cual Python agrupa las declaraciones. Cuando se ingresa una declaración compuesta de forma interactiva, debe ir seguida de una línea en blanco para indicar que se completó, ya que el intérprete no puede determinar cuándo se ha escrito la última línea. Cada línea dentro de un bloque básico debe tener la misma sangría. La función `print ()` escribe el valor de los argumentos que se le especifican, puede manejar múltiples argumentos, cantidades de punto flotante y cadenas. Las cadenas se imprimen sin comillas y debe insertarse un espacio entre los argumentos.

4. Resultados y discusión

Se estableció un esquema funcional de cómo debe operar el sistema desarrollado. Se obtuvo la información completa del funcionamiento, operación y programación del módulo ESP32CAM. Se interpretó la documentación de la plataforma IoT Blynk para el almacenamiento y procesamiento de la información enviada por el módulo ESP32CAM. Se realizó el algoritmo para la programación del módulo ESP32CAM, para la conexión WiFi y el reconocimiento facial y se estructuró el diagrama de flujo. Se descargó y ejecutó la aplicación de Blynk en un teléfono móvil, para implementar la operación de ésta. Se interpretó la documentación de la estructura general de un programa en lenguaje Python para la programación del módulo ESP32CAM. En los trabajos realizados en los últimos años, referentes al control de autenticación, se utilizaron diferentes métodos y no se ha realizado una aplicación similar a la presentada en este trabajo.

5. Conclusiones

Se desarrolló un sistema para autenticar estudiantes que realicen exámenes en línea. La autenticación utiliza una aplicación de la plataforma de IoT Blynk. El sistema integrado por el módulo embebido ESP32CAM, accede a la Internet usando tecnología WiFi. Se cumplieron las etapas correspondientes al procesamiento de la información. El instrumento utilizado en la etapa correspondiente a la obtención y procesamiento de la información, para los temas investigación, fue la de documentos y registros. La información obtenida con el instrumento fue adecuada y suficiente para el desarrollo de los temas. Los recursos que se requirieron fueron accesibles. El beneficio de esta investigación es totalmente académico. Se consideraron algunos límites, pero también la manera de resolverlos. La exactitud y tiempo de respuesta del algoritmo a implantar son adecuados para la aplicación en tiempo real. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Como trabajo a desarrollar en el futuro inmediato, se tiene planeado acudir a la Oficina de la Coordinación General para el Fortalecimiento Académico y Vinculación de la Universidad donde los autores laboran para contactar instituciones y organizaciones de evaluación de la educación media superior y superior y proponer la implementación del sistema de autenticación aquí presentado en un escenario real y práctico.

6. Bibliografía

1. Pardo A. y Rodríguez-Casals C., "Fraude Académico en la Universidad: Análisis de un Caso Real, el Conflicto y su Resolución", Archivos Analíticos de Políticas Educativas, vol. 27, no. 40, pp. 2-19, 2019, <http://dx.doi.org/10.14507/epaa.27.2829>.
2. Martínez A., Borjas M. y Andrade J. J., "El fraude académico universitario: el caso de una universidad privada en la ciudad de Barranquilla", Revista del Instituto de Estudios en Educación Universidad del Norte, vol. 22, pp. 105-115, 2015, <https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/zona/article/view/5832/6879>.
3. Galindo D. I., Huaranga S. J. y Samaniego G. L., "Reconocimiento facial para la identificación de los alumnos en exámenes finales en la modalidad presencial de la Universidad Continental-Huancayo", Tesis de Licenciatura, Universidad Continental, Huancayo, Perú, 2021, https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11570/1/IV_FIN_103_TE_Galindo_Huaranga_Samaniego_2021.pdf.
4. Murala D. K., "METAEDUCATION: State-of-the-Art Methodology for Empowering Feature Education," IEEE Access, vol. 12, pp. 57992-58020, 2024.
5. Abichandani P., Sivakumar A., Lobo D., Iaboni C. and Shekhar P., "Internet-of-Things Curriculum, Pedagogy, and Assessment for STEM Education: A Review of Literature," IEEE Access, vol. 10, pp. 38351-38369, 2022.
6. Zhao J. et al., "A Secure Biometrics and PUFs-Based Authentication Scheme With Key Agreement For Multi-Server Environments," IEEE Access, vol. 8, pp. 45292-45303, 2020.
7. Li S., Zhang B., Wu L., Ma R. and Ning X., "Robust and Sparse Least Square Regression for Finger Vein and Finger Knuckle Print Recognition," IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 19, pp. 2709-2719, 2024.
8. Li N. et al., "Chinese Face Dataset for Face Recognition in an Uncontrolled Classroom Environment," IEEE Access, vol. 11, pp. 86963-86976, 2023.
9. Botezatu C., Ibsen M., Rathgeb C. and Busch C., "Fun Selfie Filters in Face Recognition: Impact Assessment and Removal," IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science, vol. 5, no. 1, pp. 91-104, 2023.
10. Saho K., Inuzuka K. and Shioiri K., "Person Identification Based on Micro-Doppler Signatures of Sit-to-Stand and Stand-to-Sit Movements Using a Convolutional Neural Network," IEEE Sensors Letters, vol. 4, no. 3, pp. 1-4, 2020.
11. Xiao R. and Liu X., "Analysis of the Architecture of the Mental Health Education System for College Students Based on the Internet of Things and Privacy Security," IEEE Access, vol. 9, pp. 81089-81096, 2021.
12. Mircea M., Stoica M. and Ghilic-Micu B., "Investigating the Impact of the Internet of Things in Higher Education Environment," IEEE Access, vol. 9, pp. 33396-33409, 2021.
13. Supriya Y. et al., "Industry 5.0 in Smart Education: Concepts, Applications, Challenges, Opportunities, and Future Directions," IEEE Access, vol. 12, pp. 81938-81967, 2024.
14. Verma A., Singh A., Anand D., Aljahdali H. M., Alsubhi K. and Khan B., "IoT Inspired Intelligent Monitoring and Reporting Framework for Education 4.0," IEEE Access, vol. 9, pp. 131286-131305, 2021.
15. Mendes E. G., Sigahi T. F. A. C. and Adriano J. D., "Teaching Electronics in the Context of Industry 4.0: A Survey on the Brazilian Scenario in the Areas of Reconfigurable Logic and Microcontrollers," IEEE Transactions on Education, vol. 67, no. 1, pp. 65-73, 2024.
16. Ahamed Ahanger T., Tariq U. and Bouteraa Y., "ANFIS-Inspired Smart Framework for Education Quality Assessment," IEEE Access, vol. 8, pp. 175306-175318, 2020.
17. Pereira A. N. et al., "Flexible Sensor Suite Integrated Into Textile for Calcium Ion and Fall Detection," IEEE Sensors Letters, vol. 6, no. 10, pp. 1-4, 2022.
18. Romputtal A. and Phongcharoenpanich C., "IoT-Linked Integrated NFC and Dual Band UHF/2.45 GHz RFID Reader Antenna Scheme," IEEE Access, vol. 7, pp. 177832-177843, 2019.

19. Othman A. and Zakaria N. H., "Energy Meter based Wireless Monitoring System using Blynk Application via smartphone," IEEE 2nd International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAET), pp. 1-5, Malaysia, 2020.
20. Romputtal A. and Phongcharoenpanich C., "T-Slot Antennas-Embedded ZigBee Wireless Sensor Network System for IoT-Enabled Monitoring and Control Systems," IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 23, pp. 20834-20845, 2023.
21. Verma Y. K., Jagadeesh M. and Adhikari M. S., "Design of Real-Time GPS Tracker Using ESP-8266 With Blynk Application," International Conference on IoT, Communication and Automation Technology (ICICAT), pp. 1-6, India, 2023.
22. Bhala T., Aggarwal A., Aggarwal S. and Gupta A., "Home Automation System using Internet-of-Things & Blynk App," IEEE Pune Section International Conference (PuneCon), pp. 1-4, India, 2023.

Preguntas conceptuales en los exámenes de Ciencias Básicas

Bastien, M. G. M.¹, González, C. M. del C.², Merchand, H. T³., Pérez, F. R.⁴, Pérez, R. A.⁵, Portilla, P. M.⁶, Zubieta, B. C.⁷

¹Departamento de Ciencias Básicas, UAM Azcapotzalco. mbastien@azc.uam.mx,
²mcgc@azc.uam.mx ³mht@azc.uam.mx, ⁴pfr@azc.uam.mx, ⁵apr@azc.uam.mx,
⁶mpp@azc.uam.mx, ⁷czb@azc.uam.mx

1. Resumen

Se presentan los avances de un proyecto en que se realiza un análisis sobre la inclusión de preguntas conceptuales en los exámenes de física y matemática de licenciatura en ingeniería. Tradicionalmente, los exámenes de física y matemática solamente incluyen problemas, pero no preguntas conceptuales porque se considera que éstas no aportan información sobre el dominio de los contenidos de las asignaturas. En los últimos años, las "técnicas" utilizadas por los estudiantes para aprobar sus cursos han cambiado; en la actualidad, se utiliza mucho memorizar las resoluciones de los problemas, en particular las resoluciones de problemas en vídeos de YouTube que circulan en las redes, sin filtros ni comentarios. La resolución de problemas no es la única fuente que tiene el docente para evaluar si el alumno ha comprendido un tema del currículo. La propuesta es utilizar, además de problemas, preguntas conceptuales para evaluar el aprendizaje.

2. Introducción

En los primeros ciclos escolares de las licenciaturas en ingeniería, el método preferido para evaluar en el campo de las ciencias exactas es el planteamiento de problemas que, por sus características, admiten diferentes caminos de resolución, pero sólo una solución, que es la que el

docente espera del alumno. Es así que los exámenes de física y matemática constan solamente de problemas, (Los exámenes de química usualmente incluyen preguntas sobre conceptos). Este punto de vista implica que la evaluación de conceptos está implícita en la resolución de problemas; sin embargo, la forma en que se resuelven los problemas determina la comprensión o no de los conceptos básicos de una teoría. Este proyecto explora lo que implica la comprensión de resolución de problemas o comprensión procedural y la comprensión de los conceptos o comprensión conceptual. El objetivo es: identificar los conceptos básicos que se tienen en las materias de matemática y física en los primeros tres trimestres del Tronco General de las licenciaturas en ingeniería de la UAM Azcapotzalco.

En general, los estudiosos del cognoscitismo distinguen dos tipos de conocimiento, el que se acciona cuando se utiliza un algoritmo, llamado conocimiento procedural y el que ponemos en acción cuando relacionamos significativamente los conceptos nuevos con otros ya almacenados en la estructura cognitiva del sujeto: el llamado conocimiento conceptual ^[1]. El primero, de tipo algorítmico, se utiliza para resolver problemas; los alumnos de licenciatura lo utilizan para resolver los problemas de exámenes o tareas, tipo “fin de capítulo” de libro de texto, con los que acreditan las materias. En otros contextos, fuera de la academia, el conocimiento procedural permite realizar actividades y resolver problemas para los que se requiere conocer los pasos y su orden para completarlos con éxito.

Por otra parte, el conocimiento conceptual se utiliza para organizar un cuerpo de conocimientos y de que modo se articulan para formular explicaciones; los conceptos pueden estar subordinados, coordinados, supraordinados, etc. Acerca de este tipo de conocimiento, es relevante la información que aportan dos conocidos cognoscitivistas: Osborne y Gilbert, quienes afirman que “la comprensión de un concepto está estrechamente relacionada con la capacidad individual para clasificar una característica que no haya sido previamente encontrada, como perteneciente (o no) a ese concepto”^[2] Con base en lo anterior podemos decir que el conocimiento conceptual nos permite conocer la estructura de una materia; en principio, los alumnos que tengan un buen conocimiento conceptual serán capaces de elaborar un mapa conceptual del tema que se estudia; esto se entiende, desde el punto de vista de la didáctica, como la comprensión cualitativa de una materia.

Actualmente, por citar un caso, la manipulación algebraica se puede realizar con diversos softwares relativamente bien conocidos; en contraparte, el conocimiento cualitativo es fundamental para la comprensión de un tema de física, matemáticas y química (FMQ) ^[3], mismo que debería ser parte fundamental del aprendizaje de los alumnos, incluso, a nivel internacional, se impulsa este tipo de conocimiento en países como Taiwán ^[4].

La comprensión conceptual en los cursos de FMQ es un aspecto fundamental para los alumnos de ingeniería porque permite contar con las bases para la comprensión y diseño óptimo de los dispositivos tecnológicos ^[5]. Por ejemplo, no es necesario conocer los detalles de las ecuaciones de

Maxwell para comprender el funcionamiento de un horno de microondas; pero al tener claros los conceptos de radiación electromagnética y su interacción con un dipolo, se puede comprender la base de su funcionamiento. Por otro lado, en matemáticas, dado el aumento del manejo de programas como Symbolab o WolframAlpha, es necesario que los alumnos no pierdan el contexto de lo que quieren resolver y comprendan las soluciones que ofrecen dichos programas, no se trata de que los utilicen sin saber y sin aplicar un criterio sobre la información que obtienen. Por ejemplo, si se trata en un curso de matemáticas, máximos o mínimos (aplicaciones de la derivada de una función), deben saber que el valor que se obtiene de la variable independiente " x ", es la abscisa de un punto sobre la gráfica de una función en donde la recta tangente a dicha gráfica tiene pendiente cero. Incluso en la enseñanza en los laboratorios de química se han realizado estudios que señalan la necesidad del análisis conceptual ^[6].

En esta investigación, uno de los primeros aspectos que nos propusimos conocer fue la importancia que los alumnos le confieren al conocimiento conceptual (comúnmente denominado "la teoría") en un curso. Para esto, se diseñó y aplicó un cuestionario exploratorio y se realizaron entrevistas individuales. En este trabajo presentamos los resultados del cuestionario realizado a 120 alumnos que cursaban materias del Tronco General (TG) de ingeniería en la UAM Azcapotzalco, que corresponde al primer año de la licenciatura.

3. Cuestionario

Para conocer la importancia que los alumnos le confieren al conocimiento conceptual, se diseñó un cuestionario que fue analizado, piloteado y discutido por los autores. El cuestionario no formó parte de los trabajos regulares de los alumnos ni de su calificación. Se les pidió a 120 alumnos de diversas asignaturas del TG que contestaran voluntariamente este cuestionario. A lo largo de tres semanas se recibieron 44 respuestas por parte de alumnos de las 10 licenciatura con un rango de créditos aprobados, entre 4 y 136. El cuestionario estuvo disponible entre la semana 7 y la semana 10 del trimestre 24-Invierno.

Paralelamente a este cuestionario se realizaron 4 entrevistas individuales con alumnos de las asignaturas "*Cinemática y Dinámica de Partículas*" e "*Introducción a la electrostática y Magnetostática*" que impartía uno de los autores en el Sistema de Aprendizaje Individualizado (SAI). Se obtuvo poca información de estas entrevistas como para poder enunciar algo en este documento. Sin embargo, la experiencia con estas entrevistas sirvió para explorar la receptividad de los alumnos entrevistados y el tipo de preguntas que les realizaremos en el siguiente trimestre lectivo de la UAM para obtener información más a fondo de las ideas que se empiezan a delinear en este estudio exploratorio.

4. Resultados y discusión

Las preguntas y resultados del cuestionario se muestran a continuación:

1. En los problemas que he resuelto de física, matemáticas y química, la teoría y conceptos son:	
Indispensables	38.6 %
Muy importantes	61.4 %
Poco importantes	4.5 %
No son necesarios	0 %

2. La teoría y los conceptos me ayudan a resolver los problemas de física, matemáticas y química.	
Siempre	43.2 %
Casi siempre	45.5 %
Algunas veces	13.6 %
Nunca	0. %

3. A cada problema de física, matemáticas y química le corresponde una fórmula que lo resuelve.	
Siempre	25 %
Casi siempre	47.7 %
Algunas veces	27.3 %
Nunca	0 %

4. Escribe por orden de importancia, de mayor a menor, las siguientes opciones que consideras al resolver un problema:	
a) Recuerdo las fórmulas	
b) Me apoyo en conceptos y teoría 13%	
c) Recuerdo la resolución de problemas equivalentes. 13 %	
d) Utilizo formulario.	
e) Veo un problema parecido en YouTube	

5. Para comprender bien un tema de física, matemáticas o química requiero conocer los conceptos y la teoría.	

6. Para resolver un problema necesito:	

Siempre	54.5 %
Casi siempre	36.4 %
Algunas veces	9.1 %
Nunca	0 %

Los conceptos, la teoría y las fórmulas	88.6%
Los conceptos y la teoría solamente	4.5 %
Sólo las fórmulas.	4.5 %
Otra	2.3 %

7. Al resolver un problema, las unidades de medida (metros, moles, kilogramos, etc.) son:	
Muy importantes	63.6 %
Importantes	34.1 %
Poco importantes	2.3 %
Irrelevantes	0 %

8. Al resolver los problemas de física, matemáticas o química lo que más necesito es recordar las fórmulas.	
Siempre	43.2 %
Casi siempre	38.6 %
Algunas veces	18.2 %
Nunca	0 %

9. Las tareas y exámenes de física, química y matemáticas deben incluir preguntas conceptuales para mejorar mi aprendizaje.	
Muy de acuerdo	31.8 %
De acuerdo	43.2 %
En desacuerdo	11.4 %
No es importante	13.6 %

Como se observa, no todas las preguntas son independientes, varias de ellas son preguntas redundantes de control porque una de las hipótesis de este proyecto es, precisamente, que la importancia que le dan los alumnos a los conceptos es menor que la que se le concede al conocimiento operacional. De acuerdo con esto, se busca verificar cuál es la importancia que los alumnos conceden a los conceptos o teoría, como coloquialmente se le llama.

Lo que observamos en la pregunta 1 es que, sorprendentemente, los alumnos consideran que para resolver un problema los conceptos son indispensables, solo en un 36.9 %. Mientras que, en principio, son 100% indispensables y el 58.7 % los consideran muy importantes. En general se identificó que el 95.6 % los considera indispensables o muy importantes; aún así, no es el 100 %. Lo anterior conduce al siguiente cuestionamiento, si para algunos alumnos los conceptos no son indispensables para resolver un problema, entonces ¿Qué es lo indispensable para resolver un problema?

En la pregunta 8, el 82 % de los alumnos responden que para resolver un problema se requiere conocer las “fórmulas”, esto se complementa con la pregunta 3 en que casi 73 % de los alumnos considera que a cada problema de FMQ le corresponde una “fórmula” que lo resuelve. Sin entrar en muchas interpretaciones de esta respuesta, podemos ver que, para la mayoría de los alumnos, los conceptos son indispensables, pero a la vez, los problemas también se resuelven conociendo la “fórmula” que le corresponde.

Es decir, que para la resolución de problemas (que es como se evalúan los alumnos) se puede utilizar el camino memorístico, pues para muchos alumnos, si lo que importa es obtener la solución, entonces los conceptos no son tan fundamentales. Sin embargo, el docente en su trabajo diario se enfoca a desarrollar la comprensión conceptual que permita resolver de forma fundamentada los problemas. Por lo que es necesario confirmar la importancia real que los alumnos conceden a la comprensión conceptual.

En la pregunta 9, que trata sobre la necesidad de incluir preguntas conceptuales en los exámenes, es revelador la forma en que se aborda el tema del conocimiento conceptual: el 25 % consideró que incluir preguntas conceptuales no mejoraría su aprendizaje; este es un punto muy interesante de análisis de las creencias de los alumnos, que abordaremos en el desarrollo posterior de este trabajo.

5. Conclusiones

En este trabajo partimos del punto de vista de que un aprendizaje completo de los contenidos de una asignatura incluye los conceptos y no sólo la memorización de fórmulas.

Los autores no tenemos dudas sobre la necesidad de la comprensión de los conceptos involucrados en la resolución de problemas de un tema específico y nos preocupa que se tenga la percepción de que para aprobar una asignatura lo único que se requiere es aplicar la fórmula adecuada, como sugieren las respuestas a la pregunta 8 sobre la necesidad de recordar fórmulas y la 9 sobre inclusión de preguntas conceptuales en las evaluaciones.

Es muy probable que la concepción de un alumno sobre la forma de responder una evaluación este cambiando en estos últimos años a raíz de la educación digital formal e informal. Esto lo expresan los alumnos de diversas formas, por ejemplo, en preguntas exploratorias, realizadas en el SAI, un

alumno expresa *“desde que punto se supone que tengo que deducir la fórmula que resuelve el problema, porque sí la conozco de videos que he visto ¿Por qué no la utilizo directamente?”* En este caso, el alumno se refería a la utilización del despeje de una ecuación de un tiro parabólico, sin pasar ni por el planeamiento ni por la deducción de la ecuación a partir de $x(t)$ y $y(t)$; lo que indica que un problema que ya resolvían los alumnos hace al menos 10 años, que implicaba partir de la ecuación de la parábola y luego despejar la variable de interés, se ha convertido ahora en un problema de memorización y no de razonamiento. Un cambio que no parece abonar a la comprensión de una materia.

Con este modo de pensar, pareciera que la finalidad de la enseñanza de física, matemática o química fuese el de mostrar como a cada enunciado de un problema corresponde una “fórmula” que lo resuelve y que hay que memorizar, para sólo cambiar los parámetros adecuados a cada nuevo problema que se les plantea a los alumnos.

Si vamos un poco más lejos en la interpretación de las respuestas del cuestionario, surge la siguiente pregunta ¿Un alumno promedio piensa que, en un examen de física, matemática o química, lo que se evalúa es la habilidad para recordar la fórmula que resuelve el problema? Es una pregunta abierta en este trabajo.

En el trabajo futuro vamos a profundizar en la forma en que los conceptos permiten evaluar la comprensión de un alumno en FMQ. Así como entender lo que significa que un 10 % de los alumnos piense que para resolver un problema no es necesario conocer ni los conceptos ni la teoría involucrados.

Consideramos que este trabajo puede incidir en la modificación del tipo de preguntas que se realizan en las evaluaciones en FMQ en el TG, no con el fin de “reducir el nivel académico” de un examen, sino con el de lograr una comprensión más amplia de las materias, que se está perdiendo paulatinamente, probablemente, a raíz de la digitalización de la educación. Más aún, ahora con la inclusión de la Inteligencia Artificial, un alumno puede pensar equivocadamente que la tediosa tarea de responder preguntas teóricas se la puede dejar a la IA para dedicarse a resolver problemas cuantitativos.

Además, no menos importante, es que este trabajo puede incidir en la modificación de estrategias didácticas que coadyuven a lograr un aprendizaje significativo de conceptos y contribuir al desarrollo de habilidades intelectuales para resolver problemas, lejos de procesos memorísticos. El aprendizaje de las ciencias básicas, además de ser necesario para el estudio de diversos campos de la ingeniería, es un proceso formativo con un gran potencial educativo para mejorar el desarrollo, en el alumnado, de habilidades de pensamiento con las cuales enfrentarán problemas que se le plantearán en la industria, en su campo profesional o en la vida cotidiana.

6. Bibliografía

5. Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (Eds.). (1999). How people learn: brain, mind, experience, and school. . National Academy Press.(Cap. 3 Learning and Transfer)
6. Osborne, R. J. & Gilbert, J. K. (1980) A Method for Investigating Concept Understanding in Science, European Journal of Science Education, 2:3, 311-321, DOI:10.1080/0140528800020311
7. Gleason, J., Bagley, S., Thomas, M., Rice, L. & White, D. (2019) The calculus concept inventory:a psychometric analysis and implications for use, International Journal of Mathematical Education in Science and Technology, 50:6, 825-838, DOI: 10.1080/0020739X.2018.1538466
8. Chiu, M. H., Guo, C. J., & Treagust, D. F. (2007). Assessing students' conceptual understanding in science: an introduction about a national project in Taiwan. International Journal of Science Education, 29(4), 379–390.
9. Passow, H. J., Passow, C. H. (2017). What competencies should undergraduate engineering programs emphasize ? A systematic review. Journal of Engineering Education, 106(3), 475-526
10. Walker, J. P.; Sampson, V. (2013). Learning to Argue and Arguing to Learn: Argument-Driven Inquiry as a Way to Help Undergraduate Chemistry Students Learn How to Construct Arguments and Engage in Argumentation During a Laboratory Course. J. Res. Sci. Teach., 50 (5), 561–596.

Comunicación socio digital por WhatsApp y e-mail como apoyo docente a una unidad de enseñanza-Aprendizaje (UEA) en la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco (UAM-A).

Hernández Martínez, L., Chávez Martínez, M., Soto Téllez, M. L., Fernández Sánchez, L., Gerardo Morales, E.E.

Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas, Área de Química. Av. San Pablo No.180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200, México.

hml@azc.uam.mx, cmm@azc.uam.mx, mlst@azc.uam.mx, lfs@azc.uam.mx,
emmanuel.gerardo.98@gmail.com

1. Resumen

Se trabajó durante el trimestre 21-I (invierno) con dos grupos de la Unidad de Enseñanza Aprendizaje (UEA) Laboratorio de estructura y propiedades de los materiales (LEPM) que se imparte en el tronco general de las carreras de Ingeniería en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de ciencias Básicas, Área de Química, durante el Programa de Transición de Enseñanza Mixta (PROTEM) por COVID-19. Los grupos de laboratorio mencionados fueron el 1

CTG89 (40 estudiantes) y 2 ; CTG85 (40 estudiantes). Se evaluaron ambos grupos con Reporte de práctica (50%), Examen individual en el Campus Virtual Azcapotzalco CAMVIA (20%), Presentación de práctica por equipo (15%) y Tareas (15 %). El porcentaje de alumnos que se comunicaron por el WhatsApp grupal fueron CTG89 72.5 % (29) y CTG85 60.0 % (24). El porcentaje de alumnos que se comunicaron por e-mail fueron CTG89 55.0 % (22), y CTG85 30.0 % (12).

2. Introducción

Soria (2013) ^[7], mencionado en Chaparro, M.,P.M. y col. (2023) ^[2], indica que los problemas de conexión a internet afectan gravemente al desempeño estudiantil y docente y Lovón y Cisneros (2020) ^[6] mencionado también en el mismo trabajo (Chaparro, M., P.M., 2023) ^[2], señalan que el uso de herramientas digitales educativas causan estrés, ansiedad, frustración, miedo y enojo; de manera que pueden dañar su salud mental y provocar dificultad para organizarse, afectando su aprendizaje.

Hernández et al., (2018) ^[5], concluyen que la comunicación socio digital es importante, pues mediante la misma el estudiantado adquiere la confianza y empatía de preguntar y resolver dudas, además se les permite enviar sus trabajos finales sin hacerlo presencialmente y también permite un ahorro económico y ecológico por el ahorro de papelería.

En un estudio llevado a cabo con docentes en el Estado de México por Delgado, T., C.O. (2019) ^[3], se concluye que las redes socio digitales más usadas son WhatsApp y Facebook y que la primera tarea de los centros escolares tendrá que ser educar a sus propios docentes para cambiar su percepción sobre las redes socio digitales.

Los autores Cervantes, C. y Alvites-Huamaní, C. (2021) ^[1], encontraron que aunque WhatsApp no fue diseñado para el entorno educativo, se volvió uno de los medios más utilizados en el proceso de enseñanza-aprendizaje, por las posibilidades que abre a la construcción del conocimiento, su facilidad de uso, acceso y vinculación a funcionalidades como el chat grupal e individual, mensajería instantánea, mensajes de voz, llamadas y video llamadas, compartir documentos, videos, audios y diversidad de páginas web

También Chaparro., M.,P.M. y col. (2023) ^[2] informan que la pandemia de COVID-19 impulsó la adopción de herramientas digitales en los sistemas educativos para facilitar los procesos formativos. Examinaron el uso de plataformas, aplicaciones y redes socio digitales con fines educativos por parte de estudiantes en Zacatecas, México. Destacaron que WhatsApp y Google Classroom son percibidas como las más eficaces. También que las redes socio digitales desempeñan un papel fundamental en la formación de los individuos en el siglo XXI, por lo que su utilización con fines educativos resulta indispensable.

Así mismo García L., A. (2024) ^[4], refiere que el uso del correo institucional en la educación se ha convertido en una herramienta fundamental para estudiantes, profesores y personal administrativo. También ofrece numerosas ventajas que mejoran la comunicación y facilitan el intercambio de información dentro de las instituciones educativas. Contar con una dirección de correo personalizada refuerza la identidad institucional.

El objetivo del presente trabajo es darse cuenta de en qué forma las nuevas tecnologías de la información como el WhatsApp y el correo electrónico ayudan a mejorar la comunicación entre alumnos y docentes durante una situación de emergencia como la del Covid-19, además de indagar los problemas que se presentan y que afectan a parte de la población estudiantil en el desempeño de las actividades de enseñanza- aprendizaje durante sus estudios universitarios.

3. Condiciones experimentales

La primera sesión se dio la información de la forma de evaluación al grupo CTG89 (lunes) y CTG85 (martes). Comienzo de las once semanas de actividades el 29 de marzo de 2021 y término el 14 de junio de 2021. Grupo CTG89: Reporte de Práctica por equipo (5 puntos), desglosados en Carátula con el nombre de alumnos, matrícula y carrera, Nombre de la práctica, Objetivos, Introducción o resumen teórico de los conceptos referentes a la práctica y bibliografía APA, Harvard consultada (0.5 puntos), Diagrama de bloques del Procedimiento experimental (2.0 p.) resumido con palabras propias, indicar imágenes y tablas de resultados que se esperan. Cuestionario de preguntas resueltas e imágenes explicativas (1.0 puntos), Bibliografía consultada de la introducción teórica y de los datos reportados en el cuestionario (0.5 puntos), Reflexión individual del tema, con base a su carrera de ingeniería como aplicación de los conceptos o propuesta de experimentos donde los utilice (1.0 p). Presentación de diapositivas Power Point de una de las nueve prácticas por el equipo, presentando cómo realizar la práctica, Objetivos, materiales a utilizar, Diagrama del desarrollo experimental, Propiedades físicas y químicas de los reactivos o materiales, resultados esperados, explicar las respuestas de las preguntas del cuestionario y Bibliografía consultada (1.5p). Tareas por equipo; enviar a través del Campus Virtual Azcapotzalco (CAMVIA) las propiedades físicas y químicas de los reactivos o materiales utilizados en la práctica, Tipo de material (natural, sintético, metálico, polímero, conductor, semiconductor o aislante, cerámico, material amorfo, material cristalino, estructura cristalina (tomando en cuenta los 14 sistemas cristalinos) (1.5p) e incluir la bibliografía consultada. Finalmente, resolución personal del Examen de cada Práctica vista, utilizando el CAMVIA (2.0 p).

Durante la primera sesión, en ambos grupos se formaron los equipos de trabajo: 8 equipos (grupo CTG85) (martes) y 8 equipos (grupo CTG89) (lunes). Se proporcionó los correos electrónicos institucionales de los profesores a los alumnos para tener mejor comunicación y adicionalmente se formaron los grupos de WhatsApp para cada grupo para también mejorar la comunicación alumnos-maestro. También el aula virtual CAMVIA se proporcionó la información referente al Calendario de actividades, forma de evaluación de la UEA y formación de los equipos de trabajo.

A continuación, se incluyen algunas imágenes de la apertura del WhatsApp grupal: Figura 1 y Figura 2.

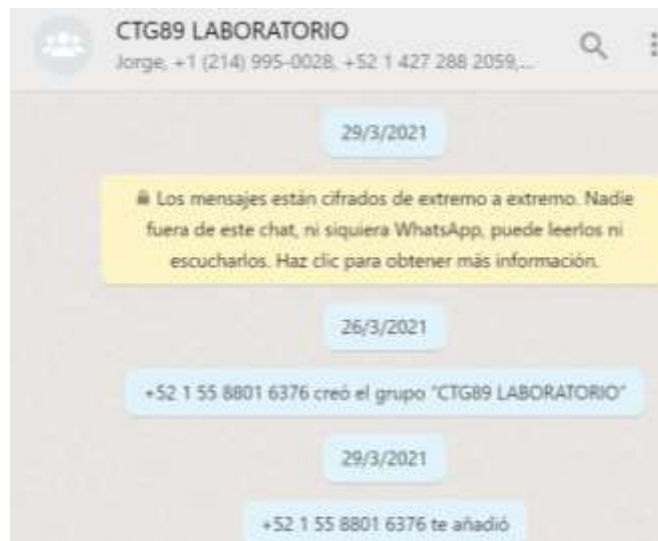


Figura 1. Apertura del grupo de WhatsApp del grupo CTG89 (lunes), Laboratorio de estructura y propiedades de los materiales, trimestre 21-I. Elaboración propia.



Figura 2. Apertura del grupo de WhatsApp del grupo CTG85 (martes), Laboratorio de estructura y propiedades de los materiales, trimestre 21-I. Elaboración propia.

Por razones de espacio no se incluyen otras imágenes de las comunicaciones.

A continuación, se incluyen imágenes de los mensajes o conversaciones a través de correo electrónico institucional del grupo CTG89 (lunes), Figura 3, de Laboratorio de estructura y propiedades de los materiales y del grupo CTG85 (martes), Figura 4, de la misma UEA, trimestre 21 Invierno.



Figura 3. Muestra un mensaje (conversación) de la comunicación alumnado- profesor, por correo electrónico del grupo CTG89 (lunes), durante el trimestre 21-I (invierno). Elaboración propia.



Figura 4. Muestra un mensaje(conversación) de la comunicación alumnado- profesor, por correo electrónico del grupo CTG85 (martes), durante el trimestre 21-I (invierno). Elaboración propia.

4. Resultados y discusión

Se contabilizaron el número de mensajes o conversaciones por WhatsApp del grupo CTG89 (lunes) y del grupo CTG85 (martes), y los resultados con relación a las calificaciones finales obtenidas se muestran la Tabla 1.

Posteriormente se muestran las figuras 5 y 6 de los resultados de ambos grupos.

Tabla 1. Número de mensajes de los WhatsApp de ambos grupos y el número de calificaciones obtenidas de los mismos.

Grupo	Calificación NA	Calificación de S	Número de B	Calificación MB
CTG89 (lunes)	0	5 (29 ms)	23 (112 ms)	12 (50)
CTG85 (martes)	2 (1 ms)	1 (0 ms)	14 (26 ms)	23 (54 ms)

De la Figura 5 se observa que solo 29 alumnos del grupo CTG89 se comunicaron por el WhatsApp grupal, dando un porcentaje de alumnos comunicados de $(29/40) \times 100 = 72.5 \%$.

De la Figura 6, se observa que 24 alumnos del grupo CTG85 (martes) se comunicaron por su WhatsApp grupal de un total de 40, y el porcentaje de alumnos comunicados de $(24/40) \times 100 = 60 \%$.



Figura 5. Muestra las calificaciones obtenidas contra el número de mensajes por WhatsApp de alumnos del grupo CTG89 (lunes) Trimestre 21I, que se comunicaron por WhatsApp y los que no se comunicaron en relación con las calificaciones obtenidas de NA, S, B y MB.



Figura 6. Muestra las calificaciones obtenidas contra el número de mensajes por WhatsApp de alumnos del grupo CTG85 (martes) Trimestre 21I, que se comunicaron por WhatsApp (verde) y los que no se comunicaron (amarillo) en relación con las calificaciones obtenidas de NA, S, B y MB.

De los mensajes por Gmail para el grupo CTG89 (lunes) se pueden explicar tomando en cuenta una línea de tiempo a inicio de trimestre (1 a 3 semanas), mediados de trimestre (semanas 4 a 6) y finales de trimestre (semanas 7 a 10). Se toman en cuenta la situación de preocupación o stress del alumnado que se comunica por e-mail. Esto se puede observar en la siguiente Tabla 2. En este grupo el número de mensajes al correo institucional del profesor fueron 37 y el número de alumnos que enviaron correos fueron 22 (55%) del total de alumnos del grupo de 40. También se observa que el número de mensajes es mayor (22) a inicios del trimestre y menor a mediados (6) y un poco mayor a finales de trimestre (9).

Tabla 2. Mensajes o conversaciones por correo electrónico Gmail del grupo CTG89 (lunes), Laboratorio de estructura y propiedades de los materiales (clave 1113087) al correo electrónico institucional del profesor.

Situación de preocupación o estrés del alumnado	Semanas 1 a 3	Semanas 4 a 6	Semanas 7 a 10
Solicitar ampliación de grupo para inscribirse a la UEA	1 ms (A; 9)		
No recibir invitación a Google meet y no poder conectarse.	8 ms (As; 3, 9, 10, 22, 25, 29, 30 y 38))		
Problema de conexión a Google meet, sesión 1, por trabajar y corte de luz, estrés por faltar.	3 ms (As; 5, 7 y 21)	1 ms (A; 18)	
Estrés por no entender cómo darse de alta al Aula virtual CAMVIA	5 ms (As; 14, 25, 37 y 40)		
Duda de cómo reportar propiedades fisicoquímicas de los Reactivos	1 ms (A; 10)		
Enviar reporte y diapositivas para dar observaciones	2 ms (A; 10)	2 ms (As; 4 y 18)	
Envío de actividades que no pudieron enviar en CAMVIA a tiempo.	2 ms (As; 15 y 24)	1 ms (A; 4)	7 ms (As; 7, 12, 14 y 15 y 40)
Estrés por fallecimiento de familiar y faltar a sesión		2 (A; 16)	
Duda por su calificación de examen de práctica (8)			2 ms (A; 7)
Total de mensajes	22 ms	6 ms	9 ms

Enseguida se presenta una línea de tiempo para el grupo CTG85, en Tabla 3.

Tabla 3. Mensajes o conversaciones por correo electrónico Gmail del grupo CTG85 (martes). Laboratorio de estructura y propiedades de los materiales (clave 1113087) al correo electrónico institucional del profesor.

Situación de preocupación o estrés	Semanas 1 a 3	Semanas 4 a 6	Semanas 7 a 10
Estrés por ser inscritos con retraso a UEA y faltar a meet	2 ms (As; 5, 27)		
No recibí enlace meet	1 ms (A: 23)		
Estrés por no entender como darse de alta en CAMVIA	4 ms (As: 5, 7, 27, 29)		
Estrés por no entregar actividades a tiempo			2 ms (As; 5, 12)
Estrés por accidente de familiar y no enviar reflexión a tiempo, no vino a P3		3 ms (A; 2)	
Motivos de salud(1) y Fallecimiento de familiar (1) falta a meet		1 ms (A; 13)	1 ms (A; 17)
Estrés por corte de luz en sesión Meet		1 ms (A; 16)	1 ms (A;36)
Pide corrección de calificación Ex 7 CAMVIA			4 ms (A; 33)
Total de mensajes	7	5	8

Se observa que el número de mensajes o conversaciones es mayor (7 y 8) a inicios y finales de trimestre, respectivamente, y menor a mediados (5). En este grupo CTG85 (martes) el número de mensajes al correo institucional del profesor fueron 20 y el número de alumnos que enviaron correos fueron 12 (30%) del total de alumnos del grupo de 40

Posteriormente se muestran en la Tabla 4, solo los mensajes del grupo CTG85 de los martes, Trimestre 21-invierno al WhatsApp del profesor.

Se observa en Tabla 4, que solo siete alumnos (As; 2, 5, 17, 19, 20, 36 y 37) sostuvieron comunicación con el profesor a su WhatsApp personal por los motivos mencionados en la tabla arriba. Número de alumnos en lista 40.

Tabla 4. Mensajes o conversaciones del grupo CTG85 (martes) al WhatsApp del profesor. Laboratorio de estructura y propiedades de los materiales (clave 1113087)

CAUSA	Semanas 1 a 3	Semanas 4 a 6	Semanas 7 a 10
Quería subir su calificación	1 ms (A; 2)		
Se inscribió tarde y problema de comunicación con su equipo	1 ms (A; 5)		
Duda sobre como reportar las P.F.Q.	1 ms (A; 5)		
Faltó al seminario el 11 mayo por fallecer familiar		1 ms (A; 17)	
Duda por calificación del examen			1 ms (A; 19)
Calificación de su participación en Tarea 8 Si participó y todo el equipo			1 ms (A; 20)
Faltó al seminario de su equipo el 31 mayo			1 ms (A; 36)
Problema para unirse a meet	1 ms a inicio del trimestre (A; 37)		

5. Conclusiones

La comunicación por WhatsApp y la comunicación por e-mail ayudaron a los grupos a mantenerse informados de forma rápida con los profesores y entre ellos mismos y para comprender mejor las tareas a realizar y resolver todas las dudas que surgieron durante la situación de emergencia por Covid-19.

También la comunicación a distancia ayudó a darse cuenta de los problemas que afectaban al alumnado en situaciones de stress o preocupación y a resolverlos de manera comprensiva y/o flexible, por la misma situación de emergencia.

Se puede observar que, a pesar de no estar presentes en el laboratorio, los resultados muestran un número alto de aprobación en ambos grupos.

6. Bibliografía

1. Cervantes, C. y Alvites-Huamaní, C. (2021). WhatsApp como recurso educativo y tecnológico en la educación. Hamut'ay, 8 (2), 69-78, <http://dx.doi.org/10.21503/hamu.v8i2.2294>. Consultado en la URL el 1 de mayo de 2024.

2. Chaparro, M., P.M. y col (2023). Uso de tecnologías digitales por estudiantes universitarios para fines educativos en la era postpandemia. Revista Electrónica Científica de Investigación Educativa. Volumen 7, enero-diciembre 2023, e1838.
3. Delgado, T., C.O. (2019), Percepción del uso de redes socio digitales por parte de docentes del Estado de México. dPerspectivas siglo XXI, Vol. 6 Núm. 11 (2019): D'Perspectivas Siglo XXI. [Vol. 6 Núm. 11 \(2019\): D'Perspectivas Siglo XXI | D'Perspectivas siglo XXI \(doperspectivas.mx\)](https://doperspectivas.mx)
4. García L, A., (2024). Descubre las ventajas del correo institucional en la educación. <https://correoinstitucionalespoch.com/contacto-docente/ventajas-de-usar-el-correo-institucional-en-la-educacion/>. Consultado en la URL el 3 de mayo de 2024.
5. Hernández, M. L., Mera, R.L., Chávez, M.M., Soto, T.M.L., Fernández, S.L., Naranjo, C.F.A. (2018). La comunicación socio digital como apoyo docente a una Unidad de Enseñanza-Aprendizaje (UEA) en la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco (UAM-A). COMPENDIO DE CIENCIA APLICADA/EDUCACIÓN. Mérida, Yucatán.
6. Lovón, M., y Cisneros, S. (2020). Repercusiones de las clases virtuales en los estudiantes universitarios en el contexto de la cuarentena por COVID-19: el caso de la PUCP. Pro pósitos y Representaciones, 8(esp.3), e588. <https://doi.org/10.20511/pyr2020.v8nSPE3.588>
7. Soria, M. (2013). Influencia del uso las redes sociales en estudiantes hispanohablantes en el tiempo de ocio y de estudio. Revista de Comunicación de la SEECI, (31), 34-51. <https://doi.org/10.15198/seeci.2013.31.34-51>

Un primer acercamiento de académicos para facilitar el uso creativo de Metaversos para la educación usando la IAGen.

Ocampo, AOA,¹ Moreno, OGME,¹ Ulloa, MCUR, ¹.

¹Facultad de Estudios Superiores Aragón - UNAM.

aoa@unam.mx, oscarespinozaf3@aragon.unam.mx, carmenulloa87@aragon.unam.mx

1. Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo describir la forma en que un grupo de académicos de la FES Aragón - UNAM se están preparando para usar la Inteligencia Artificial generativa (IAGen) para crear un entorno virtual donde los alumnos de licenciatura de diferentes carreras puedan interactuar en el Metaverso. Para lograr esta tarea se impartieron dos cursos, tomando en cuenta las recomendaciones de la UNESCO y la UNAM para el uso ético y responsable de IAGen en la enseñanza y el aprendizaje. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran una gran participación de los docentes y se ha diseñado un kit de Realidad Aumentada que hace mas interactivo la unión del mundo físico con el mundo virtual. También se utilizaron

sitios web con IAGen para construir un metaverso en plataformas comerciales como Spatial IO y Unity. Se utilizó la escala Likert para medir actitudes, opiniones y comportamientos con encuestas a los participantes obteniendo resultados favorables.

2. Introducción

Según el reporte elaborado por la UNESCO y la Alianza Nacional para la Inteligencia Artificial (ANIA) la Metodología de Evaluación del estadio de preparación (Readiness Assessment Methodology, RAM, por sus siglas en inglés) es una herramienta de diagnóstico diseñada para ayudar a los Estados miembros a cumplir con su compromiso de implementar la inteligencia artificial (IA) de manera ética y responsable ^[1]. La RAM destaca brechas institucionales, regulatorias o de datos, permitiendo a la UNESCO adaptar el apoyo a los gobiernos para garantizar un ecosistema de IA ético.

En el caso de México, enfrenta desafíos para lograr el desarrollo ético de la IA. Aunque participa activamente en foros internacionales desde 2018, otros países han avanzado más en esta área. El Índice Latinoamericano de IA de 2023 señala un nivel bajo para México en visión, institucionalidad y estrategia.

México destaca en privacidad, transparencia y acceso a la información, pero aún enfrenta desafíos en acceso a la justicia para personas de bajos recursos y grupos históricamente discriminados. En educación, la escolaridad promedio ha aumentado, pero persisten brechas de género en carreras STEM (acrónimo que tiene su origen de las siglas en inglés: Science, Technology, Engineering y Mathematics). En innovación, México lidera en inversión pública en investigación, pero la inversión per cápita es menor que el promedio regional, y el gasto público en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) ha disminuido. La infraestructura de conectividad móvil también presenta desafíos. Pero en general, dicho informe presenta una visión fundamentalmente optimista de que la gobernanza ética y la regulación responsable de la IA son totalmente consistentes con la innovación y el crecimiento económico, y son esenciales para garantizar un ecosistema tecnológico que beneficie al bien público.

Por otro lado, la UNAM ha publicado un documento con recomendaciones para el uso ético y responsable de IAGen en la enseñanza y el aprendizaje ^[2]. Este material proporciona pautas para aprovechar el potencial de la IA generativa en el aula y enfatiza la importancia de la transparencia en el uso de IAGen para empoderar a los docentes y mejorar la calidad educativa. Este documento motiva a los académicos a usar las herramientas ya existentes, diseñar ambientes de aprendizaje y evaluación más conducentes para generar aprendizaje significativo y pensamiento crítico, enfatizando la importancia de la evaluación formativa para el aprendizaje.

Sin embargo, en la vida cotidiana un elemento tecnológico que está presente en los estudiantes es el uso de los video juegos y ahora el Metaverso que ofrece oportunidades y amenazas. Para comprenderlo plenamente, debemos explorar campos como la antropología digital ^[3]. La creación de un metaverso inclusivo y ético es un desafío tanto técnico, como social, se ha discutido si el metaverso es simplemente una evolución técnica de Internet o algo más. La cuestión de cómo dar forma al metaverso se debatió en la Reunión Anual del Foro Económico Mundial celebrada en Davos en 2022

y en 2023, y en dos ocasiones Chris Cox, director de productos de Meta, enmarcó el metaverso como una mera evolución técnica de Internet, minimizando su potencial impacto social. Cox lo describió repetidamente como simplemente "Internet, pero menos plano". Por el contrario, Tom Boellstorff, un antropólogo pionero que explora mundos similares al metaverso, ha pedido que se abra el debate sobre qué es el metaverso, reconociendo cómo su definición moldeará las nuevas normas y estándares sociales.

Utilizando estas referencias como base un grupo de académicos de la FES Aragón–UNAM de diferentes carreras inician su preparación técnica para conocer los desafíos y oportunidades que ofrece el Metaverso, construido con aplicaciones basadas en IAGen.

3. Interacción y preparación para entender el Metaverso

La tecnología Metaverso se basa en ocho tecnologías básicas: redes, computación en la nube, inteligencia artificial, visión por computadora, blockchain, robots, interacción del usuario y realidad extendida que se puede expresar como la suma de: Realidad Virtual (RV) + Realidad Aumentada (RA) + Realidad Mixta (RM). Esta interacción conduce a la formación de entidades y objetos virtuales que tratan e interactúan a su vez con el mundo real.

Como se puede ver, los temas son bastante complejo ya que involucran muchas habilidades técnicas, así que, los profesores alejados de las ciencias físico-matemáticas muestran cierto temor al enfrentarse a la comprensión de cómo está construido el Metaverso. Por lo cual, nos dimos a la tarea de preparar dos cursos de capacitación divididos en dos periodos intersemestrales, con la intención de ganar su interés estos cursos se planearon con la promoción de reutilizar modelos 3D generados en cualquier disciplina que involucre diseño: Arquitectónico, eléctrico, mecánico o lo que tuviera que ver con herramientas digitales. Las y los participantes del segundo curso fueron convocados para crear aplicaciones web/móviles que mostraran los principios básicos para ubicar objetos digitales dentro del metaverso.

3.1 Desarrollo de un kit para realidad aumentada.

En la primera capacitación para los profesores interesados el objetivo se centró en combinar aspectos de la educación a distancia en línea y el diseño de contenidos multimedia con un enfoque de aprendizaje basado en proyectos. Una de las técnicas más adecuadas para lograr nuestro propósito fue reutilizar modelos 3D para mostrarlos en Realidad Aumentada (RA), que consistió básicamente en crear un entorno superpuesto del mundo real con contenido digital interactivo o información digital basada en el contexto. Por lo tanto, la primera capacitación se enfocó al diseño de

un kit de aprendizaje de RA, donde básicamente se integró el uso del software Unity3D y la comunicación con un microcontrolador y la nube.

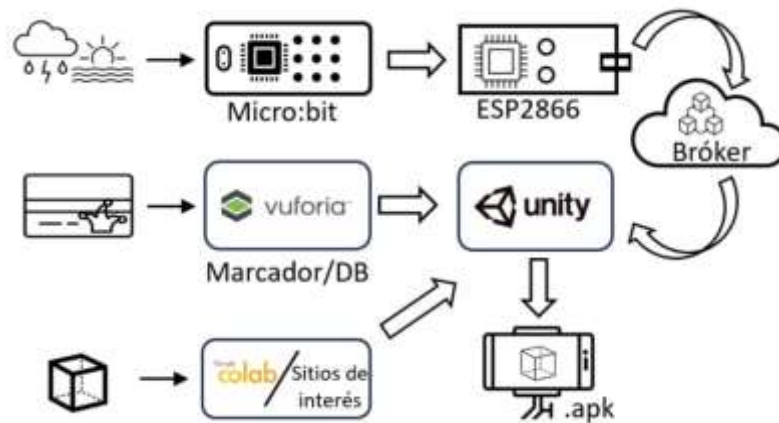


Figura 1. Primer curso, diseño del Kit AREEX como puente entre el mundo físico y el mundo virtual.

La implementación del kit AREEX llamado así por el acrónimo de Augmented Reality (AR) y Robótica Evolutiva Experimental (REEX) se diseñó para usar el protocolo MQTT (por sus siglas en inglés Message Queing Telemetry Trasport) como puente entre el dispositivo móvil y el microcontrolador, el kit interactúa entre el mundo físico a través de sensores conectados a la tarjeta electrónica Micro:Bit y el mundo virtual a través de modelos 3D con reconocimiento automático en tiempo real usando la API en C++ y Vuforia Engine SDK 10.15. La segunda opción para usar el kit es a través de marcadores de AR que proporcionan las posiciones y orientaciones de cualquier objeto holográfico en la aplicación creados con software prefabricado y códigos de script ^[4]. Y la tercera opción para usar este kit es creando un modelo matemático en tres dimensiones usando Google Colaboratory (colab) y librerías como “PIFuHD” que es una implementación para el software “pytorch” de funciones para alinear píxeles multinivel para la digitalización del cuerpo humano en 3D de alta resolución y “surf2stl.py” para exportar superficies 3D a un archivo de formato STL.

3.2 Diseño de Metaverso con APPs de IAGen.

Nuestra intención con el segundo curso fue simplificar lo más posible el uso de herramientas especializadas en el diseño del metaverso y centrarnos más en la parte creativa usando la IAGen. El

diagrama general de la figura 2 muestra como se fue guiando a los profesores con ejemplos en el Metaverso explorando el concepto básico de vector que se utiliza en física y matemáticas, usando el software Unity3D y algunas plataformas comerciales.

Nuestro objetivo fue proporcionar herramientas a los profesores y conocimientos para integrar el metaverso en sus cursos, aprovechando al máximo las capacidades de estas plataformas.

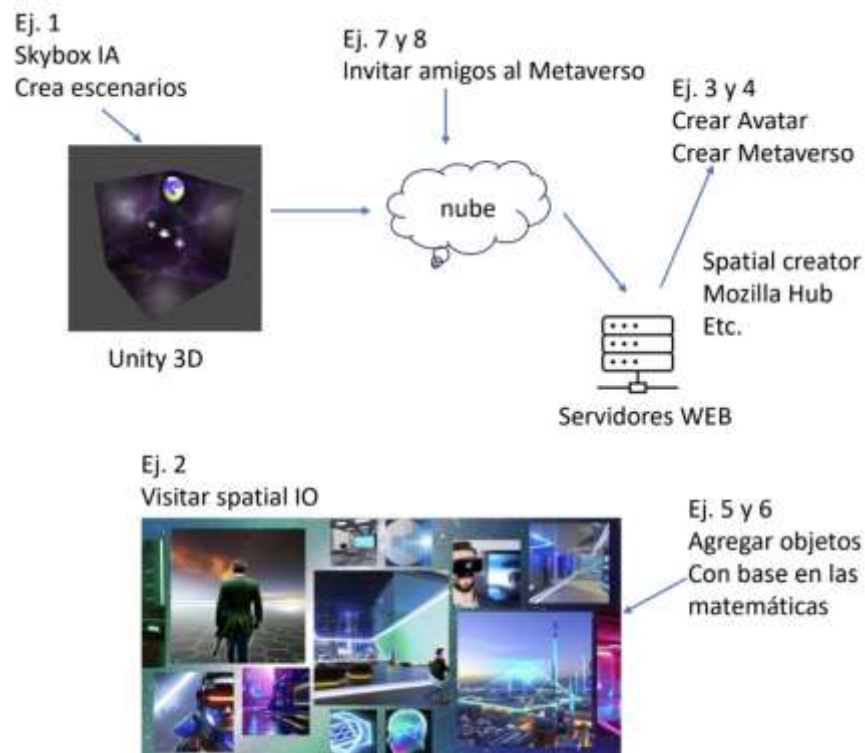
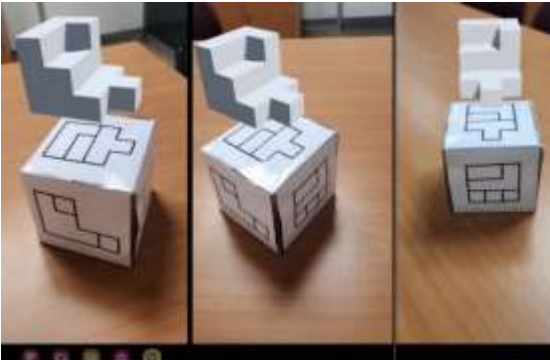
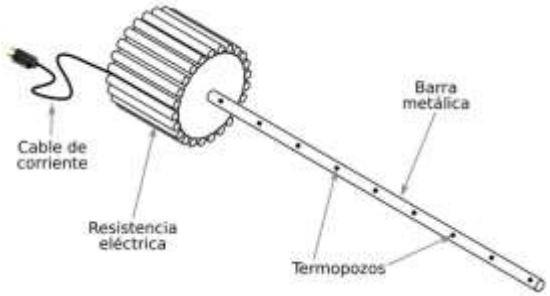


Figura 2. Segundo curso, ejemplos para entender el Metaverso.

4. Resultados y discusión

La realidad aumentada y la realidad virtual están transformando la educación, y los profesores universitarios están desempeñando un papel crucial en este cambio. A continuación, se muestran algunos de los resultados de los profesores que se están aventurando en diseñar experiencias didácticas innovadoras, al utilizar herramientas como Unity y reutilizando modelos 3D, los docentes están desarrollando aplicaciones personalizadas para sus asignaturas, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Trabajos innovadores de los profesores.

Materia	Objetivo	Avance
Matemáticas VI	Usar la Realidad Aumentada para que los estudiantes logren una mejor comprensión sobre la generación de objetos tridimensionales a partir de sus diferentes vistas bidimensionales.	
Transferencia de calor	Mejorar la enseñanza de los principales fenómenos de transferencia de calor y del diseño de aletas de enfriamiento mediante el uso de herramientas de realidad aumentada.	 
Estadística y probabilidad	Desarrollar un sistema que utilice Google Colab para la generación y análisis de datos, Vuforia para la detección y seguimiento de marcadores en el mundo real, y Unity Hub para la creación de experiencias de Realidad Aumentada que presenten gráficas estadísticas de manera interactiva y atractiva.	

Re-Arquitectura	Mejorar la enseñanza-aprendizaje de los alumnos de posgrado de arquitectura que estudian los procesos de deterioro de los edificios con valor patrimonial a partir de la elaboración de un modelo de realidad aumentada compatible con la plataforma Unity e incorpore sensores que midan valores medioambientales, para conocer el grado de deterioro del inmueble.	

La integración de la IA generativa y el metaverso abre un mundo de posibilidades creativas y transformadoras. En la tabla 2, mostramos los sitios web con IA que utilizamos para combinar estas dos tecnologías. Y en la figura 3, se muestra una parte del metaverso creado con Unity.

Tabla 2. Sitios web con IAGen utilizados para crear un Metaverso

Sitios web con IA	Descripción
Skybox IA	Simplifica la creación de mundos 360° con solo un clic. Los profesores generaron paisajes virtuales a partir de descripciones de texto. Esto facilita la visualización y la comunicación de conceptos complejos.
Meshcapade	Permite crear modelos 3D de manera intuitiva, lo que es esencial para la construcción de entornos virtuales realistas.
HeyGen	Ofrece la posibilidad de crear videos de alta calidad con avatares generados por IA y voces. Los profesores lo utilizaron para explicar conceptos, presentar proyectos o personalizar el aprendizaje.
LumaAI (Image 3D)	Es otra opción para generar contenido de video educativo. Su capacidad para traducir automáticamente videos a diferentes idiomas amplía el alcance de los materiales educativos y crea modelos 3D.
Spatial IO	Los profesores diseñaron su entorno virtual inmersivo. Se pueden crear aulas virtuales, laboratorios, museos o incluso mundos ficticios para experiencias de aprendizaje únicas.
Unity	Como motor de desarrollo, ofrece un amplio abanico de posibilidades. Los docentes crearon aplicaciones básicas personalizadas, simulaciones interactivas y experiencias 3D.

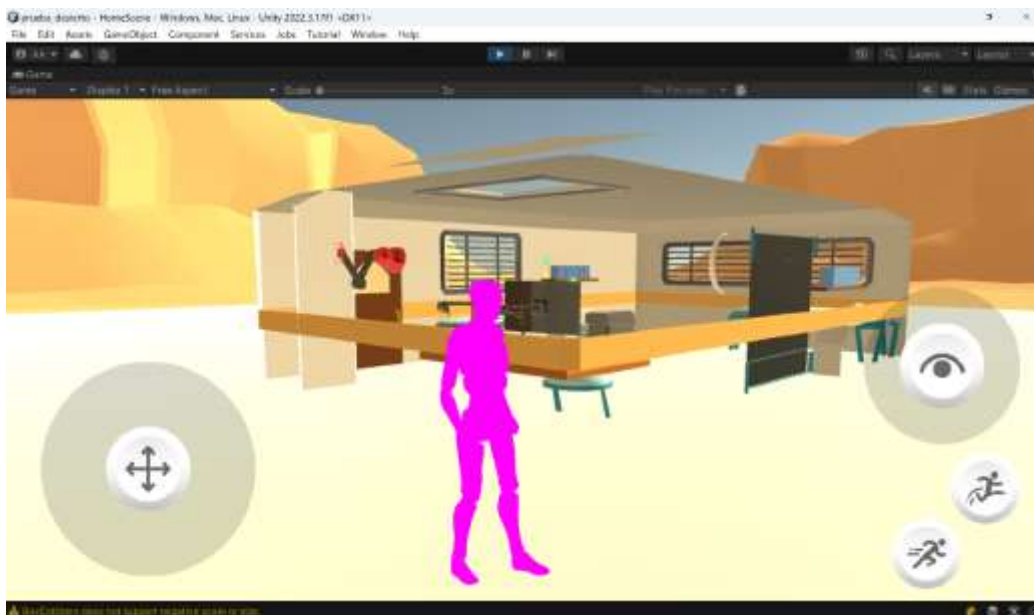


Figura 3. Metaverso creado con Unity.

Una vez terminada la capacitación se procedió a aplicar el modelo ADDIE ^[5] que básicamente es un enfoque sistemático utilizado en el diseño instruccional para crear programas de formación efectivos. La muestra estuvo conformada por 20 académicos de 8 entidades diferentes de la UNAM, durante los semestres 2024-1 y 2024-2. Se utilizó una escala de Likert (tabla 3), utilizando la siguiente estructura:

Tabla 3. Escala de Likert

Dimensiones	Indicadores	Instrumentos	ITEMS
ANÁLISIS	Análisis de la infraestructura	Escala de Likert	3
	Análisis del contenido		2
DISEÑO	Actividades de aprendizaje	Escala de Likert	2
	Objetivos de aprendizaje		2
	Mecanismos de evaluación		1
IMPLEMENTACIÓN	Entorno virtual	Escala de Likert	3
	Monitoreo		2

De acuerdo con los datos estimados por la escala de Likert, se observa en la tabla 4 los resultados de los cursos son favorables al mantener la mayoría de los ítems en los valores de 5 (siempre) y 4 (casi siempre).

Tabla 5. Resultados de escala Likert

Fases	Siempre	Casi siempre	Regularmente	Casi nunca	Nunca
ANÁLISIS	44 %	32 %	21 %	3 %	0 %
DISEÑO	58 %	25 %	16 %	1 %	0 %
IMPLEMENTACIÓN	57 %	30 %	13 %	0 %	0 %

5. Conclusiones

En este trabajo se describió la forma en que un grupo de académicos de la FES Aragón-UNAM recibieron la capacitación para usar la RA usando modelos 3D prefabricados y usaron la IAGen para crear un entorno virtual donde los alumnos de licenciatura de diferentes carreras pueden interactuar en un Metaverso creado con Unity.

Podemos afirmar que los profesores universitarios que se aventuran en la creación de metaversos están liderando una revolución en la enseñanza. Su dedicación al aprendizaje de nuevas herramientas y su creatividad al construir entornos virtuales son esenciales para preparar a los estudiantes para el futuro.

6. Bibliografía

Las referencias deben indicarse dentro del texto principal como superíndice encerradas en corchetes ^[1] y ser numeradas consecutivamente en el orden que sean referidas.

1. UNESCO, “México: evaluación del estadio de preparación de la inteligencia artificial”, <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000390568>, 2024.
2. UNAM, “Recomendaciones para el uso de la inteligencia artificial generativa en docencia”, <https://cuaed.unam.mx/descargas/recomendaciones-uso-iagen-docencia-unam-2023.pdf>, 2023.
3. Lost in the metaverse? How digital anthropology can help leaders navigate uncertain futures, <https://www.weforum.org/agenda/2023/03/digital-anthropology-leaders-navigate-metaverse/>

4. Ocampo., Diseño del Kit AREEX para crear aplicaciones didácticas de Realidad Aumentada,
5. Maribe, R. (2009). Instructional Design: The ADDIE Approach. Springer Science
<http://dx.doi.org/10.1007%2F978-0-387-09506-6>

Impacto de herramientas basadas en IA en la formación de alumnos de Licenciatura en Tecnologías de la Información.

García, I,¹ Vega, G.Y,².

¹Escuela Superior de Tizayuca, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Km 2.5 Carretera Federal Tizayuca-Pachuca, C.P. 43800, Tizayuca, Hidalgo. México

garciaisma10@gmail.com, gaby@uaeh.edu.mx

1. Resumen

La revolución digital ha impulsado una demanda creciente de competencias digitales. En la presente investigación se centra en identificar y evaluar las estrategias efectivas para la incorporación de herramientas basadas en inteligencia artificial (IA) dentro de los programas académicos, con especial atención en su impacto sobre el desarrollo de competencias digitales. Además, se analiza la percepción de los estudiantes respecto a la implementación de estas herramientas, considerando aspectos como la motivación, la participación activa y el grado de preparación frente a los desafíos tecnológicos futuros. A través de este estudio, se busca no solo comprender el papel transformador de la IA en la Educación Superior sino también proporcionar una base para el diseño de estrategias pedagógicas que optimicen los beneficios de estas tecnologías en la formación de competencias digitales, esenciales para la inserción y el desarrollo profesional en un mercado laboral cada vez más digitalizado y globalizado.

2. Introducción

Para los estudiantes, el uso de tecnología implica una mayor responsabilidad y empoderamiento en su proceso de aprendizaje, pueden gestionar su tiempo de estudio con mayor flexibilidad, accediendo a materiales educativos y evaluando su propio

progreso a través de plataformas digitales. Esto contribuye al desarrollo de habilidades blandas esenciales para la vida y el ámbito laboral, como por ejemplo la organización y gestión del tiempo, la colaboración, y la comunicación. La tecnología educativa también fomenta una educación más inclusiva, ofreciendo oportunidades para atender a estudiantes con necesidades específicas y minimizar las barreras al aprendizaje. Muchas instituciones educativas enfrentan restricciones presupuestarias que limitan su capacidad para adquirir, actualizar y mantener las tecnologías necesarias para implementar herramientas de IA, esta situación resulta en un acceso desigual a recursos digitales avanzados, tanto para estudiantes como para docentes, lo que repercute directamente en la calidad y la modernidad de la educación impartida, la resistencia al cambio por parte del cuerpo docente también surge como una barrera significativa; a pesar de la importancia de las competencias digitales, muchos educadores se encuentran cómodos con métodos de enseñanza tradicionales y pueden mostrar escepticismo o renuencia hacia la adopción de nuevas tecnologías. Esta resistencia se debe, en parte, a la falta de formación específica en herramientas de IA, lo que genera incertidumbre sobre cómo integrarlas efectivamente en el proceso educativo.

Además, las limitaciones en el currículo actual constituyen un obstáculo adicional. Los planes de estudio de muchas Licenciaturas en Tecnologías de la Información no han evolucionado al ritmo de los avances tecnológicos, resultando en un enfoque que frecuentemente se queda corto frente a las demandas cambiantes del mercado laboral. La rigidez curricular y la lentitud en la actualización de los contenidos educativos impiden la inclusión oportuna de habilidades digitales avanzadas y el uso innovador de herramientas de IA para su enseñanza.

La Inteligencia Artificial (IA) ha emergido como un pilar fundamental en la transformación de múltiples sectores, incluyendo el educativo, ofreciendo innovadoras estrategias para enriquecer el proceso formativo y consolidar un aprendizaje innovador y productivo. Definida como un campo de estudio enfocado en emular la conducta inteligente mediante procesos computacionales, la IA ha evolucionado desde ser un concepto de ciencia ficción hasta convertirse en una realidad activa que influye significativamente en nuestra vida cotidiana y en la forma en que aprendemos y enseñamos.

En el contexto educativo, la IA propone una revolución en las metodologías de enseñanza, facilitando el diseño de programas de estudios avanzados, tutorías personalizadas y la creación de contenidos de aprendizaje personalizados. Estas aplicaciones permiten abordar las necesidades individuales de los estudiantes, optimizando su proceso de aprendizaje y ofreciendo soluciones adaptadas a sus estilos y ritmos particulares de aprendizaje. Este enfoque se dirige hacia una educación más digitalizada e interactiva, respaldado por las aulas virtuales, es crucial para preparar a los estudiantes para los desafíos del siglo XXI, promoviendo un aprendizaje más personalizado, colaborativo e inclusivo^[1].

Por lo tanto, el presente estudio se enfoca en abordar estos desafíos, explorando el impacto de las herramientas basadas en inteligencia artificial en la formación de competencias digitales y buscando identificar estrategias efectivas para superar las limitaciones existentes. A través de este análisis, se aspira a proporcionar recomendaciones concretas que permitan mejorar la implementación de tecnologías de

IA en programas académicos y, en última instancia, cerrar la brecha entre la educación en tecnologías de la información y las demandas del mercado laboral.

De acuerdo a García (2023), la integración de inteligencias conversacionales en el sector educativo promete transformar la manera en que enseñamos y aprendemos, haciéndolo más interactivo, accesible y personalizado. A medida que estas tecnologías continúan desarrollándose, el potencial para mejorar la educación y empoderar a los estudiantes es inmenso, marcando el comienzo de una nueva era en la enseñanza

3. Condiciones experimentales

La investigación se centra en la implementación y evaluación de un taller de herramientas digitales basadas en inteligencia artificial (IA) para estudiantes de la Licenciatura en Tecnologías de la Información en la Escuela Superior de Tizayuca. Para evaluar el impacto de estas herramientas en la formación de competencias digitales, se adoptará un enfoque de métodos mixtos, combinando técnicas cuantitativas y cualitativas. Este enfoque mixto no solo permitirá una medición de los cambios en las competencias, sino que también proporcionará una comprensión de las experiencias estudiantiles y la efectividad pedagógica del taller. Cada sesión del taller se centra en aspectos prácticos del desarrollo de IA, desde la conceptualización hasta la implementación. Los estudiantes trabajarán con ChatGPT y otros sistemas para crear soluciones a problemas reales, con énfasis en la personalización y optimización de la interacción humana-computadora.

Se realizarán pruebas de competencias digitales antes y después del taller (pre-test y post-test) para cuantificar el desarrollo de habilidades y la adquisición de competencias. Estas evaluaciones permitirán medir los cambios objetivos en el conocimiento y habilidades de los estudiantes, así mismo se llevarán a cabo entrevistas con una muestra de participantes para explorar sus conocimientos, experiencias y la aplicabilidad de lo aprendido en contextos reales para comprender los efectos intangibles del taller, como la motivación y la confianza en el uso de las tecnologías de la IA, así como la percepción de su relevancia profesional.

La población total de este estudio está compuesta por 118 estudiantes que están actualmente matriculados en la Licenciatura en Tecnologías de la Información en la Escuela Superior de Tizayuca, de acuerdo a la información que envían de la Dirección de Administración Escolar^[3]. Con este dato se realiza el tamaño de la muestra con un 95% de confianza y de acuerdo a la fórmula 1, por lo que la muestra de la investigación es de 91 estudiantes que participarán en este estudio.

$$n = \frac{N\sigma^2 Z^2}{(N-1)e^2 + \sigma^2 Z^2} \quad (1)$$

El diagnóstico de necesidades es una fase crucial en nuestra investigación, que tiene como objetivo principal identificar las competencias digitales actuales de los estudiantes de la Licenciatura en Tecnologías de la Información, así como determinar sus necesidades específicas de mejora. Esta evaluación inicial es esencial para adaptar el diseño y contenido del taller de herramientas digitales basadas en inteligencia artificial, asegurando que se aborden de manera efectiva las áreas de deficiencia identificadas. Se implementarán protocolos de seguridad estrictos para asegurar que todos los datos recogidos se almacenen y procesen de manera segura. Esto incluye el uso de servidores

seguros y el cumplimiento de las normativas locales e internacionales sobre protección de datos.

4. Resultados y discusión

Al integrar plataformas como Knewton, los estudiantes pueden acceder a un aprendizaje personalizado que se ajusta a su ritmo y nivel de conocimiento. Este tipo de tecnología permite identificar las áreas donde cada estudiante necesita adaptar el contenido educativo para abordar estas deficiencias, optimizando el tiempo de estudio y maximizando el aprendizaje. Estas plataformas también promueven un enfoque de aprendizaje autodirigido, crucial para el desarrollo profesional continuo. Al aprender a gestionar su proceso de aprendizaje, los estudiantes mejoran su capacidad para mantenerse actualizados con las rápidas evoluciones tecnológicas. En el contexto educativo de la Licenciatura en Tecnologías de la Información en Tizayuca, la evaluación del impacto de la inteligencia artificial (IA) en la formación de competencias digitales es fundamental. Esta evaluación ayuda a entender no solo el nivel de habilidades técnicas adquiridas, sino también la capacidad de los estudiantes para aplicar estas habilidades en escenarios reales y su preparación para enfrentar desafíos futuros en el ámbito profesional.

En la encuesta realizada al final del curso se tuvieron los siguientes resultados de los ítems más significativos en este taller:

1. ¿Cómo calificarías tu experiencia general en el curso? Un 90% de los participantes calificaron su experiencia general con una puntuación alta.
2. ¿El contenido del curso cumplió tus expectativas? El 98 % de los participantes indicaron que el contenido del curso cumplió o superó sus expectativas.
3. ¿Recomendarías este curso a otros estudiantes o profesores? En este ítem el 95% de los participantes recomendaría el curso a otros. En este sentido los participantes argumentaron sus respuestas incluyendo la importancia del contenido para el curso ya que se ajusta a cualquier profesión, así como a la utilidad práctica de las herramientas aprendidas.
4. ¿Hay algún comentario adicional que quieras compartir sobre tu experiencia en el curso? Los comentarios adicionales refuerzan la percepción positiva del curso y destacan la utilidad práctica del contenido para mejorar competencias específicas relacionadas con la inteligencia artificial y herramientas digitales que se pueden utilizar en la vida académica.

El impacto y los beneficios del taller sobre ChatGPT y herramientas digitales no solo ha incrementado las competencias digitales de los estudiantes, sino que también ha mejorado su capacidad para aplicar estos conocimientos en contextos reales y relevantes. Los beneficios observados incluyen:

Mejora en el uso de tecnologías de IA, donde los estudiantes han aprendido a utilizar ChatGPT para una variedad de aplicaciones, desde la detección de noticias falsas hasta la creación de contenido.

Fomento del pensamiento crítico: A través del análisis y evaluación de información, los estudiantes han desarrollado habilidades esenciales para su carrera profesional.

La Preparación para el futuro: El curso ha preparado a los estudiantes para enfrentar los desafíos tecnológicos de su campo, proporcionándoles herramientas y conocimientos que les serán de utilidad en el contexto real de su profesión.

5. Conclusiones

El análisis de la encuesta de satisfacción muestra que el curso sobre ChatGPT y herramientas digitales fue bien recibido por la mayoría de los participantes como lo muestra la figura 1. Los puntos positivos destacados incluyen la calidad del instructor, la relevancia y utilidad del contenido, así mismo, el impacto positivo en las competencias digitales de los estudiantes. La mayoría de los participantes recomendaría el curso a otros, lo que sugiere un alto nivel de satisfacción general.

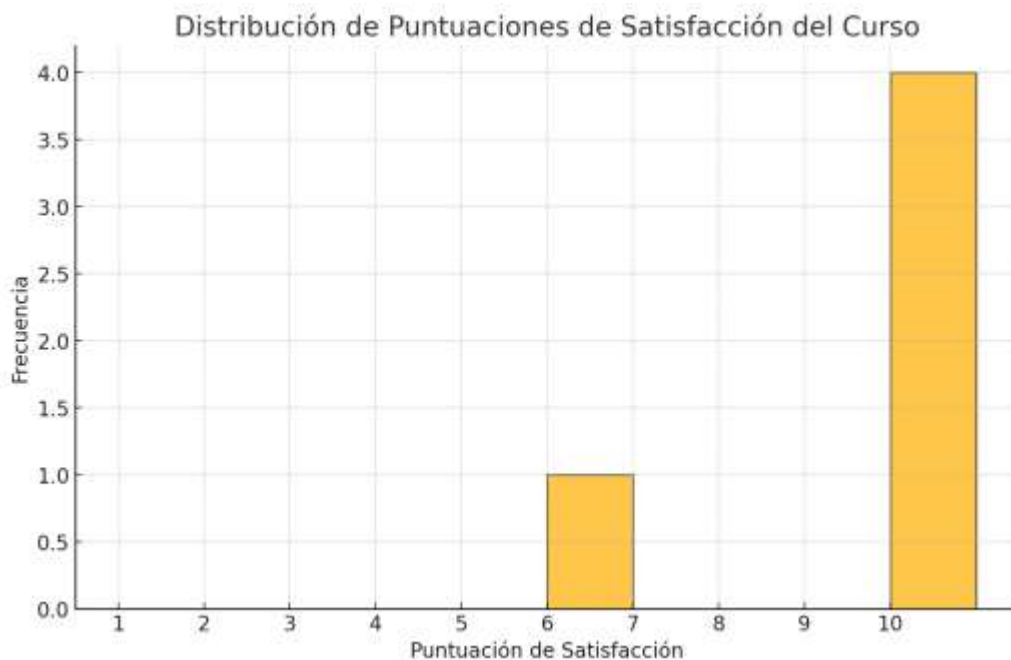


Figura 1 Nivel de satisfacción del curso

El curso ha demostrado ser una herramienta valiosa para los estudiantes de la Licenciatura en Tecnologías de la Información de la Escuela Superior de Tizayuca. Ha proporcionado una sólida base en el uso de herramientas de inteligencia artificial, específicamente ChatGPT, y ha fomentado habilidades críticas como la detección de noticias falsas y el pensamiento crítico. Los estudiantes han expresado su apreciación por la estructura del curso y la relevancia del contenido para sus futuros roles profesionales.

6. Bibliografía

1. Miranda, C. (27 de 1 de 2021). Pearson. Obtenido de Pearson: <https://blog.pearsonlatam.com/educacion-del-futuro/aulas-virtuales-su-impacto-en-la-educacion-actual>
2. García-Peñalvo, F. J. (2023). La nueva realidad de la educación ante los avances de la inteligencia artificial generativa. AIESAD, 45.
3. UAEH, «Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,» UAEH, 22 enero 2024. [En línea]. Available: www.uaeh.edu.mx. [Último acceso: 6 marzo 2024].
4. Carbonell, C. (18 de 08 de 2023). scielo.org. Obtenido de scielo.org: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2665-02822023000200152&lang=es
5. Salinas, D. (31 de 12 de 2023). WIXBlog. Obtenido de WIXBlog: <https://es.wix.com/blog/2023/12/tipos-de-inteligencia-artificial>
6. Santiago, C. (2007). redalyc.org. Obtenido de redalyc.org: <https://www.redalyc.org/pdf/761/76102311.pdf>

La deserción de los estudiantes a nivel superior: desde su perspectiva

Quintana D. María B. G.¹, Rodríguez Q. Berenice G.²

¹ Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Av. San Pablo 420. Col. Nueva el Rosario. C.P.02128. CDMX

² Universidad Iberoamericana, Prolongación Paseo de la Reforma 880. Lomas de Santa Fe.C.P.01219.CDMX

mbgd@azc.uam.mx, p42316@correo.uia.mx

1.- Resumen

El problema de la deserción de los estudiantes a nivel superior, obedece a una combinación de razones que involucran no solo a la persona como individuo, sino también como ente social. Esta conjunción de razones es diferente para cada uno de ellos, porque cada individuo tiene una historia de vida y un aprovechamiento académico diferente. En este trabajo se presenta un estudio de caso a partir de una encuesta realizadas a los estudiantes de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, para indagar, desde su perspectiva cuales son las

principales razones que los inducen a desertar. La decisión es individual y ésta involucra una combinación de razones personales, académicas, económicas y sociales, transformándose en un fenómeno grupal.

2.- Introducción

La deserción se refiere a la salida de un estudiante de un programa educativo antes de completarlo y es un problema que afecta a las Instituciones de Educación Superior en todo el mundo. Este fenómeno puede tener consecuencias negativas tanto para las personas como para las instituciones educativas. Para los estudiantes, la deserción puede significar la pérdida de tiempo, dinero y oportunidades de carrera. Para las instituciones de educación superior, la deserción puede afectar su reputación y financiamiento, así como la calidad de la educación que ofrecen.

La investigación del fenómeno de la deserción a nivel superior, está encuadrada dentro de un marco teórico, que define el curso de la investigación, así como la interpretación de los resultados obtenidos. Debido a su complejidad, con el fin de interpretar y analizar la información aquí obtenida, se recurrió a diferentes teorías con perspectivas: sociológica, económica, humana y pedagógica.

La teoría de la identidad social, se fundamenta en la idea de que por valiosa y compleja que sea la imagen que el estudiante tiene de sí mismo en relación con el universo físico y social que le rodea, algunos aspectos de esta idea son proporcionados por la pertenencia a ciertos grupos sociales ^[1].

De esta manera, el concepto que el estudiante tiene de sí mismo estaría conformado por su identidad social, esto es, el conocimiento de que pertenece a determinado grupo social junto a la significación emocional y de valor que tiene para él dicha pertenencia. Esta teoría sugiere que las personas buscan mantener una coherencia y estabilidad en su sentido de identidad, y que los eventos y experiencias que amenazan esta coherencia pueden llevar a la desmotivación y a la deserción.

La teoría del desarrollo humano, se enfoca en el ser y hacer de la persona, definiendo el desarrollo como un proceso de expansión de las libertades reales de las que disfrutaban los individuos, en los entornos sociales, económicos, culturales, políticos y medioambientales que se encuentren, realizando cosas valiosas para ellos y sus familias ^[2].

Esta teoría sugiere que el desarrollo humano es un proceso de expansión de las libertades reales de las que disfrutaban las personas, que abarca diversos dominios, incluyendo el cognitivo, el emocional y el social. Los factores emocionales y sociales, como la ansiedad, la depresión, la presión social, entre otras, pueden contribuir a la decisión de abandonar los estudios.

La teoría de la persistencia del estudiante, se orienta en los factores que influyen en la capacidad de los estudiantes para persistir en la educación superior y completar sus

estudios. Los factores pueden incluir el apoyo social, el compromiso académico, la satisfacción con la experiencia educativa, entre otros ^[3].

La teoría del ciclo vital familiar. Esta teoría sugiere que las familias transitan por diferentes etapas en su ciclo de vida, asociadas a cambios en la composición del núcleo familiar y, también, en las relaciones entre sus miembros, cada etapa con diferentes desafíos y demandas. Toda la familia puede verse influenciada y alterada por factores internos y externos, por ejemplo, el sistema cultural, las expectativas sociales y los cambios políticos ^[4]. Por tanto, un estudiante que tiene que asumir responsabilidades familiares y escolares, se enfrentaría a la posibilidad de desertar.

La teoría del capital humano. Esta teoría sugiere que la inversión en capital humano, como la educación superior, puede aumentar el potencial de ingresos y mejorar las oportunidades laborales. El conocimiento y la salud determinan el incremento de la productividad individual y el crecimiento económico ^[5]. Sin embargo, los estudiantes que enfrentan dificultades económicas pueden sentir que los costos de la educación superior superan los beneficios y optan por abandonarla. Por lo tanto, la deserción escolar a nivel superior se vería como una pérdida de inversión y una reducción en el potencial de ganancias futuras.

La teoría de la elección racional, sugiere que las personas toman decisiones racionales y calculadas fundamentadas en la información disponible y en el costo-beneficio percibido ^[6]. En el caso de la deserción escolar a nivel superior, se podría argumentar que los estudiantes deciden abandonar la universidad debido a factores como el costo financiero, la falta de motivación, la falta de oportunidades laborales.

La teoría de la reproducción social, sugiere que las desigualdades sociales y económicas tienden a perpetuarse de generación en generación, y que las oportunidades educativas pueden estar influenciadas por factores como la clase social, el origen étnico, la cultura entre otros ^[7]. Por ejemplo, los estudiantes que pertenecen a grupos marginados enfrentan barreras sociales y culturales que limitan su acceso y su éxito en la educación superior.

3.- Condiciones experimentales

Es un estudio de caso, que explora las razones que motivan a la deserción en estudiantes a nivel superior. El propósito es comprender bajo qué condiciones el estudiante deserta, con base en sus pensamientos, sentimientos, opiniones, creencias.

Contexto y participantes. La investigación se realizó en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco. La obtención de la información fue al azar a una muestra de 100 estudiantes, hombres y mujeres que pertenecen a diferentes niveles educativos, quienes participaron voluntariamente.

Instrumento. La recolección de información se realizó a través de un cuestionario de preguntas abiertas ^[8].

4.- Resultados y Discusión

A partir de la información recabada, en cada individuo hay un conjunto de razones que pueden causar la deserción. Éstas se generan al interior o de forma externa al estudiante, y son un conjunto diferente en cada caso. No obstante, el resultado final apunta a un fracaso en la enseñanza a nivel superior.

Las razones que influyen en la deserción que son atribuibles directamente a la persona son:

- ✓ La falta de orientación vocacional, el estudiante no tiene una idea clara de las metas y objetivos profesionales. Al no estar el individuo seguro de la carrera elegida, pierde el interés con una percepción de no avanza hacia algún objetivo concreto.
- ✓ Preparación académica deficiente. Al no estar adecuadamente preparado, puede tener dificultades para mantenerse al día con el ritmo y complejidad de los cursos, provocando una sensación de desánimo. Esta preparación deficiente puede hacerse patente, como la falta de habilidades en la lectura, escritura, matemáticas y pensamiento crítico. Dificultando el entendimiento de conceptos y teorías que se enseñan en la universidad.
- ✓ Desinterés hacia los contenidos curriculares, delimitado por la comprensión de su significado y el entendimiento de su pertinencia, relevancia y utilidad en la vida profesional. Ausubel y colaboradores ^[9], demostraron que cuando el individuo aprecia la importancia de un conocimiento, se forma una opinión positiva hacia lo que aprende y los resultados del aprendizaje son mejores. Los conocimientos, adquieren un significado cuando el saber puede ser asimilado en la estructura del conocimiento del estudiante y una significación cuando los conocimientos son interesantes de manera que resulten adecuados y relevantes.
- ✓ Falta de capacidades en la persona, como son: la comunicación, la responsabilidad, el compromiso, el trabajo colaborativo, la resolución de problemas y el pensamiento crítico. Importantes para el entendimiento teórico de un tema en específico.
- ✓ La intención y disposición personal hacia las actividades educativas, que es generada por una necesidad, que induce a la acción ^[10]. Esa acción es impulsada por la motivación, que controla y mantiene la conducta para hacer algo según se necesite y depende de varios elementos que aparecen o desaparecen de acuerdo

con las circunstancias, qué a su vez están determinadas por fenómenos sociales, culturales y económicos ^[11].

- ✓ Existencia de un trastorno mental en la persona, originando problemas para concentrarse en los estudios y el cumplimiento de las exigencias académicas, afectando de forma negativa su autoestima y su capacidad para socializar con sus compañeros y profesores.

Las razones que influyen en la deserción que no son imputables directamente a la persona son:

- La situación en el ámbito familiar, la idea (positiva o negativa) que tiene el estudiante de sí mismo, generada y/o fomentada por las expresiones familiares como indicativos de las expectativas de los padres, que lo animan o desaniman. El apoyo familiar depende del grado de responsabilidad delegado al individuo al interior del núcleo familiar.
- ✓ La situación social del individuo que incluye amigos y compañeros de clase, que puede afectar la motivación y compromiso con los estudios. Esta influencia familiar y social según Mc Clelland y Pilon ^[12] generan el estímulo en el estudiante como una cualidad que posee el mismo.
- ✓ La situación en el ámbito económico delimitada por las dificultades financieras: costo de la matrícula (que puede ser difícil de pagar), costo del alojamiento (dificultad para encontrar alojamiento asequible), costo de los libros de texto (algunos de ellos costosos), costo del transporte público (costo significativo de transporte para llegar a las clases).

Cada conjunto de razones adquiere una mayor o menor relevancia en el estudiante de acuerdo al momento en que se encuentra en la trayectoria académica. Durante el transcurso de los estudios universitarios el estudiante muestra interés por diversas metas académicas, en un inicio este interés se enfoca en la obtención de una calificación aprobatoria y conforme transcurre el tiempo se orienta al logro de la autonomía cognoscitiva con el surgimiento de reacciones emotivas en la realización de las tareas ^[13].

Para demostrar lo expuesto anteriormente, enunciaremos textualmente algunas de las razones manifestadas por los estudiantes.

“Yo deserto porque mi familia opina que es muy difícil que yo logré terminar una carrera universitaria”.

La falta de apoyo familiar hace que el estudiante dude acerca de sus capacidades y habilidades para poder llevar con éxito el proceso educativo, creando en él un sentimiento de inseguridad que prevalece y limita la confianza en sí mismo (teoría de la

persistencia del estudiante). Y que puede además generar una falta de sentido de pertenencia a la comunidad universitaria (teoría de la identidad social).

“Personalmente lo que me ha llevado a atrasarme en la carrera y a abandonar las asignaturas, fue que en mi segundo año de la carrera a mi papá le detectaron cáncer en una etapa muy avanzada, esto llevó a mi familia a un momento crítico y personalmente me condujo a una etapa de depresión, fue durante este periodo que deje de darle importancia a la universidad y me atrase aproximadamente un año”.

La enfermedad y/o pérdida del padre del estudiante provocó un problema familiar y la necesidad de sostenerse a sí mismo o a sus familiares (teoría del ciclo vital familiar). Generando en el estudiante tristeza, decaimiento anímico y pérdida de interés por todo (teoría del desarrollo humano). Propiciando el descuido de las actividades académicas y finalmente la deserción (teoría de la elección racional).

“Durante la pandemia sentí que todo era más fácil, entonces ahora que es presencial ha sido más complicado por tener menos disposición de tiempo, menos herramientas. También me he sentido presionada por avanzar y ponerme al corriente con mi plan de estudios tomando una mayor carga académica a la que acostumbro y acabó siendo contraproducente”

La ansiedad que sufre el estudiante es debida a su situación social, denotada por la pérdida de tiempo en el traslado del hogar a las instalaciones universitarias (teoría de la reproducción social), además de no contar con todas las herramientas disponibles (teoría del desarrollo humano) y la saturación de carga académica (la teoría de la persistencia del estudiante).

“El volver de la pandemia a la modalidad presencial ha sido difícil y me saturé con la carga de materias y al tener tanto trabajo, me presionó y me llegó a desenfocar de alguna materia, además de que algunos temas difíciles hacen que entre en frustración al no entender”

Las causas de la deserción están delimitadas en un principio por la presión social al tratar la persona de cumplir con los tiempos establecidos en la comunidad universitaria para la obtención de un título profesional (teoría de la identidad social), así como por la situación personal al carecer de ciertas habilidades provocando estrés asociado con el trabajo académico (teoría del desarrollo humano).

“Una mayor carga académica implica una mayor carga de trabajo que se va complicando conforme avanza el curso, por falta de tiempo no puedo dedicar la atención suficiente requerida por la materia”

La deserción depende de la consecución de las metas académicas que la persona considera como convenientes e importantes que están supeditadas al nivel de empeño del individuo. Una mayor carga de trabajo implica un mayor tiempo de dedicación a los estudios (teoría de la persistencia del estudiante).

“Por contratiempos personales y de transporte no me es posible llegar a clase y al no conocer bien algún compañero del grupo no puedo conseguir los apuntes, por lo que no puedo comprender el tema. Al no saber nada de lo que se está viendo en clase, no encuentro sentido a seguir en una materia donde no estoy aprendiendo nada”.

La situación social de la persona (teoría de la identidad social), y la reducida capacidad de comunicación con los compañeros, aunado a su dificultad para entender los temas del curso y su preparación previa (teoría del desarrollo humano) originan la falta de interés y motivación hacia la asignatura (teorías de la persistencia del estudiante) y la posible deserción.

“En lo personal para evitar desertar las asignaturas deben cumplir con mis expectativas, siendo además importante la forma en cómo se trabaja en clase”

El estudiante muestra interés por los contenidos temáticos de las asignaturas, para obtener conocimientos que le resulten adecuados en su formación profesional (teoría del desarrollo humano). Sin embargo, al no cumplirse sus expectativas puede entonces pensar en desertar (teoría de la persistencia del estudiante).

“Me gusta que al final del curso se solicite un proyecto final sencillo que conste de un diseño, programa o maqueta”

Ausubel y colaboradores ^[9], demostraron que cuando la persona aprecia la importancia de los conocimientos, se forma una buena opinión hacia lo que aprende y los resultados del aprendizaje son mejores (teoría de la elección racional). Es evidente la importancia de encontrar actividades que permitan estimular en la persona la atención e interés por el conocimiento.

“La sobrecarga de tareas es un factor importante en la deserción, sobre todo cuando en las clases no se proporcionan las herramientas necesarias para su resolución”

Feldman y Paulsen ^[14] descubrieron que los grados de discernimiento y la calidad que alcanzan las personas sobre los conocimientos de una disciplina científica están directamente vinculados con su motivación. Para Carrillo ^[10] esta motivación determina la dirección y el nivel de ímpetu en qué se actúa.

El empleo de estrategias motivacionales es particularmente importante al inicio del curso, período de tiempo en donde la persona se crea una apreciación y una perspectiva de la asignatura, donde forma una visión de los contenidos del programa, y construye una idea de su pertenencia y relevancia, lo que produce o no el interés que se verá manifestado en las actitudes ^[15].

“Es importante la actitud que tiene el profesor frente a grupo, algunos de ellos tienen una actitud arrogante o donde quieren hacer sentir intimidados e inferiores a los alumnos induciendo a la deserción”

En este caso, la actitud del profesor causa una reacción desfavorable acerca de su persona y del proceso educativo. En general, las actitudes de una persona son una predisposición aprendida relativamente estable, en tanto causa una reacción valorativa, favorable o desfavorable acerca de un objeto, persona, grupo, ideas o situaciones. Expresadas por medio de opiniones o planteamientos a favor o en contra, que impulsa a una acción acorde con las cogniciones y sentimientos que se tienen, provocando el aprecio o desprecio, y revela disposición de hacer o dejar de hacer algo ^[16].

No obstante, es deseable que el profesor instaure estrategias que permitan en la persona un determinado aprendizaje, haciendo que el objeto de estudio sea interesante en un ambiente agradable ^[17]. Estas estrategias involucran cargas afectivas y suscitan reacciones emocionales que pueden ser positivas o negativas, originando estados de bienestar (alegría, orgullo) o malestar (angustia, frustración) ^[18].

5.- Conclusiones

La deserción escolar se considera como uno de los principales problemas que enfrentan las Instituciones de Educación Superior en México. Se puede decir que los estudiantes abandonan la universidad debido a factores de diversa índole, como personales, académicos, económicos y sociales.

Entre los factores personales se encuentran la falta de motivación, la baja autoestima y la carencia de apoyo familiar. Los factores académicos incluyen el bajo rendimiento académico, la dificultad para adaptarse al ritmo de la institución y la falta de interés por la carrera elegida. Los factores económicos comprenden la falta de recursos financieros para cubrir los gastos de la universidad y la necesidad de trabajar para ayudar a la familia. Los factores sociales engloban la falta de integración en la universidad, la discriminación.

Es importante señalar que la deserción escolar es un fenómeno complejo que no puede atribuirse a un solo factor. Por lo general, es el resultado de una combinación de factores que interactúan entre sí.

6.- Bibliografía

- 1.- Scandoglio B., López Martínez J. S., San José Sebastián M. C. (2008). La teoría de la identidad social: una síntesis crítica de sus fundamentos, evidencias y controversias. *Psicothema*. V2. No. 1. Pp. 80-89.
- 2.- Sen Amartya (2000) *Desarrollo y libertad*. Barcelona. Editorial Planeta.
- 3.- Fernández de Morgado Nelly (2012). Retención y persistencia estudiantil en Instituciones de Educación Superior: Una aproximación interdisciplinaria al concepto. *Paradigma*. V XXXIII. No. 2. 63-88.

- 4.- Moratto Vásquez N. S., Zapata Posada J. J., y Massager T. (2015). Conceptualización de ciclo vital familiar: una mirada a la producción durante el periodo comprendido entre los años 2002 a 2015. *Revista CES Psicología*. V8. N0. 2. 103-121.
- 5.- Pérez Fuentes D. I., Castillo Loaiza J. L. (2016). Capital humano, teorías y métodos: importancia de la variable salud. *Economía, Sociedad y Territorio*. V 16. No. 57. 651-673.
- 6.- Abitbol Pablo y Botero Felipe (2006). Teoría de elección racional: estructura conceptual y evolución reciente. *Colombia Internacional*. No. 62. 132-148.
- 7.- Rizzo Nadia (2012). Un análisis sobre la reproducción social como proceso significativo y como proceso desigual. *Revista Sociológica*. V27. No.77.
- 8.- Sampieri H. R., Fernández C. C., Baptista L. P. (2010) *Metodología de la investigación*. Ed. Mc Graw Hill. Quinta Edición.
- 9.- Ausubel, David Paul, Joseph Novak y Helen Hanesian (1986). *Psicología educativa, un punto de vista cognoscitivo*. Ed. Trillas. México.
- 10.- Carrillo M., Padilla J., Rosero T., Villagómez M. S. (2009). La motivación y el aprendizaje. *ALTERIDAD. Revista de Educación*. vol. 4. 20-32.
- 11.- Abarca, Sonia (1995). *Psicología de la motivación*. Ed. Universidad Estatal a Distancia. San José Costa Rica.
- 12.- Mc Clelland D. C. & Pilon D. A. (1983). Fuentes de motivos adultos en los patrones de comportamiento de los padres en la primera infancia. *Revista de personalidad y psicología social*. 44 (3). 564-574.
- 13.- Otis, N., Grouzet, F. y Pelletier, L. (2005). Latent Motivational Change in an Academic Setting: A 3-Year Longitudinal Study. *Journal of Educational Psychology*, 97 (2), 170-183.
- 14.- Feldman. Kenneth y Michael B. Paulsen. (1999). *New Directions for Teaching and Learning*. San Francisco. Jossey-Bass Publishers.
- 15.- Piaget, Jean (1970). "Piaget's Theory". En Paul H. Mussen (ed.). *Carmichael's Manual of Child Psychology*. Vol.1. New York. Wiley & Sons. p. 710-756.
- 16.- Morales Pedro (2009). *Medición de actitudes en psicología y educación*. Universidad Pontificia: Madrid.
- 17.- Polanco Hernández Ana (2005). La motivación en los estudiantes universitarios. Revista electrónica. *"Actualidades Investigativas en Educación"*. Universidad de Costa Rica.
- 18.- Plutchick Robert & Kellerman Henry (1980). *Emotion: Theory, research, and experience, vol.1: Theories of Emotion*. New York Academic.

DESARROLLO DE LABORATORIO VIRTUAL PARA EFECTUAR UN ENSAYO DE METALOGRAFIA

Portillo, J. D.¹, Velasco, P. A. D.¹, Bautista, B.L.Y.¹, Cornelio, S.E.¹, Garza, V. A.¹,
Hurtado, C. G.¹

¹ División de Ingeniería Mecánica e Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, C.P. 04510, México

david4603581@gmail.com, davidvp.advp@gmail.com,
yair.bautista@ingenieria.unam.edu, erickcsbatman@gmail.com,
alejandra.garza@ingenieria.unam.edu, gahucho@ingenieria.unam.edu

1. Resumen

Se presenta el desarrollo de un laboratorio virtual para la práctica de metalografía, basado en un laboratorio real de la Facultad de Ingeniería UNAM. Se realizaron visitas para capturar imágenes y videos de la práctica que sirvan como referencia en su virtualización, los modelos 3D de equipos y materiales se crearon utilizando herramientas de CAD, optimizando los modelos para bajo consumo gráfico y buena calidad visual. La implementación del entorno virtual en un motor gráfico, y su posterior exportación a una plataforma inmersiva permitieron construir un espacio interactivo y funcional. El desarrollo incluyó la programación de algoritmos de interacción para recrear las acciones reales que se realizan en el laboratorio. Los resultados muestran un entorno inmersivo y eficiente con potencial uso educativo, permitiendo un primer acercamiento, o la posibilidad de repetir la práctica sin depender de la disponibilidad de un laboratorio físico y lo que eso implica.

1.1 Abstract

A virtual laboratory for metallography practice was developed, based on a real laboratory at the Faculty of Engineering, UNAM. Visits were made to capture images and videos of the practice to serve as references in its virtualization. The 3D models of equipment and materials were created using CAD tools, optimizing the models for low graphic consumption and good visual quality. The implementation of the virtual environment in a graphics engine and its subsequent export to an immersive platform allowed the construction of an interactive and functional space. The development included the programming of interaction algorithms to recreate the real actions performed in the laboratory. The results show an immersive and efficient environment with potential use for education, allowing a first approach or the possibility of repeating the practice without depending on the availability of a physical laboratory and all that it entails.

2. Introducción

Los entornos virtuales de aprendizaje (VLE) ofrecen una experiencia inmersiva que enfatiza la presencia social y la colaboración, introduciendo un nivel de interactividad sin precedentes que apoya al proceso de enseñanza aprendizaje cuando son empleados como recurso educativo, esto permite a los estudiantes participar en un aprendizaje profundo y exploratorio en un entorno más auténtico y vívido. Según la investigación de un grupo de investigación en Inteligencia Artificial en Educación de la Universidad Normal Central de China, la aceptación de la tecnología está directamente relacionada con la satisfacción en el aprendizaje. Este hallazgo subraya la importancia de incorporar tecnología fácil de usar en los entornos de aprendizaje para mejorar la satisfacción de los estudiantes. [1]

Por otro lado, la enseñanza de la metalografía es fundamental para distintos profesionales de la ingeniería: mecánicos, químicos, industriales, aeroespaciales, civiles, de minas, mecatrónicos, por mencionar algunos. Comprender los fenómenos a escala microscópica es crucial en la ingeniería, ya que proporciona la base para mejorar la selección de materiales, optimizar procesos de fabricación, innovar en el desarrollo de nuevos materiales metálicos, resolver problemas y fallos, y mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los productos y procesos. La comprensión de este tema permite a los ingenieros diseñar soluciones más efectivas para una amplia variedad de aplicaciones, por ello se requieren prácticas de laboratorio en donde los estudiantes puedan realizar algunos ensayos metalográficos para relacionar lo que hayan estudiado teóricamente con un contenido aplicativo; en ocasiones, se hace uso de simuladores para apoyar y complementar la formación práctica ya que los laboratorios podrían estar rebasados en su operación. No obstante, lo anterior presenta un nuevo paradigma ya que algunas instituciones no cuentan con el software adecuado para impartir clases y prácticas que normalmente se realizan en un laboratorio bien equipado; además, existen limitaciones presupuestarias, falta de espacio físico y desafíos relacionados con el acceso a la tecnología y el conocimiento necesario por parte de los estudiantes. Según expertos de la Universidad Estatal del Sur de Manabí en Jipijapa, Ecuador, muchos ciudadanos, especialmente en países de América Latina, no están en una posición favorable respecto a las tecnologías y desconocen los posibles beneficios que podrían obtener de las mismas principalmente por tener barreras de inserción muy elevadas, como puede ser la dificultad de uso. [2]

En el campo de estudio de los materiales, la mayoría del software disponible está diseñado para apoyar actividades presenciales, dejando de lado los sistemas de enseñanza híbridos y atemporales que han surgido como aprendizaje post pandémico en mejora de la educación, y se orienta principalmente hacia una finalidad puramente industrial, lo cual demuestra que el desarrollo de software especializado en la enseñanza de la metalografía tiene cabida para nuevas propuestas como la que se presenta en este trabajo. El desarrollo de un laboratorio virtual para efectuar ensayos de metalografía no

solo llenará un vacío importante en la educación de la ingeniería, sino que también ofrecerá una herramienta innovadora para mejorar la comprensión y aplicación de la metalografía previo a la práctica profesional, de ahí la importancia del desarrollo que se presenta y de los resultados operativos del mismo, llegando hasta un nivel de implementación y pruebas en diferentes plataformas que promoverán su accesibilidad y usabilidad. [3]

3. Descripción del escenario

3.1 Situación específica del laboratorio

Para desarrollar este laboratorio virtual, se utilizó como referencia la realización de la práctica “Caracterización metalográfica de los materiales” del Manual de prácticas del Laboratorio de Materiales I para observar los procedimientos prácticos y evaluar la mejor manera de hacer su adaptación a un entorno virtual. Durante este análisis, se identificaron los siguientes puntos: la cantidad limitada de equipos disponibles impide la participación continua de todos los alumnos durante la práctica; algunos equipos requieren mantenimiento o reemplazo de piezas; disponibilidad limitada de material para desbaste fino y pulido; el tamaño reducido del laboratorio dificulta el libre desplazamiento; el tiempo asignado a la práctica es limitado para que todos los alumnos puedan completar los procedimientos; el desbaste fino y el pulido requieren mucha habilidad para eliminar todas las imperfecciones de las etapas anteriores, lo que representa un desafío para los estudiantes sin experiencia previa; es fundamental seguir estrictamente las normas de seguridad en el manejo de productos químicos utilizados en el ataque y observación metalográfica.

3.2 Funcionamiento físico

De acuerdo con el Manual de Prácticas del Laboratorio de Materiales I, el desarrollo de este laboratorio virtual se centrará en la "Práctica 2: Caracterización Metalográfica de los Materiales". El análisis metalográfico comprende varias etapas cruciales para obtener una visualización precisa de la microestructura de un material. Estas etapas son: preparación de la muestra (desbaste, pulido, ataque), observación de macro y microestructura, e identificación de microconstituyentes y fases. [4]

La realización de todos los pasos descritos en el manual permite que el estudiante distinga claramente los microconstituyentes y sus fases respectivas, proporcionando información valiosa sobre los tratamientos térmicos y mecánicos que ha recibido el material; la combinación de estos métodos ofrece una visión detallada y completa de la estructura interna del material, facilitando evaluaciones precisas sobre sus propiedades,

calidad y antecedentes de procesamiento, llegando inclusive hasta la identificación propiamente del metal en cuestión.

Para observar a los usuarios realizar las actividades descritas en el Manual, se realizó una visita al laboratorio real para obtener imágenes y videos de las actividades durante la práctica. Se identificaron las acciones realizadas durante la práctica, como el lijado de piezas (operación que se realiza entre dos alumnos, mientras uno sostiene la pieza con una cara apoyada contra la lija, el otro lubrica la lija con agua), pulido, y el ataque químico con nital. Estas acciones se pueden observar en la figura 1.

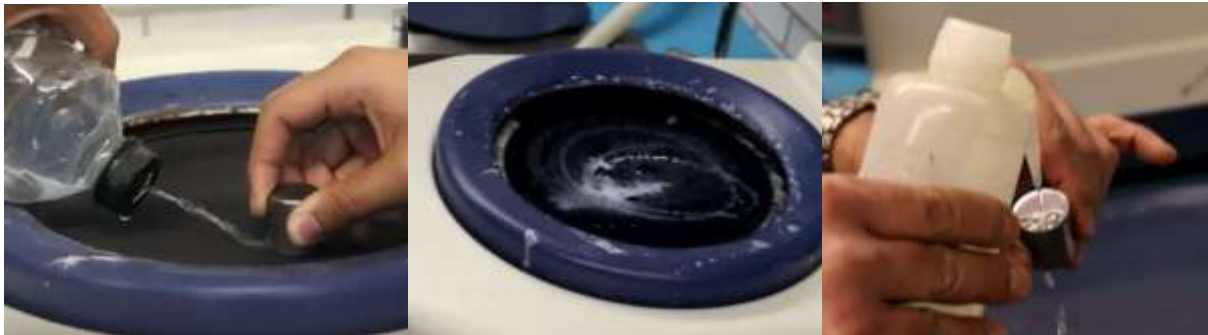


Figura 1. De izquierda a derecha: lijado, pulido, ataque químico en la prueba real.

Al entrar en contacto con la probeta, equipo y herramientas empleadas en el laboratorio, se tomaron los datos dimensionales y de apariencia para su virtualización. Para la probeta se tomaron fotografías de cada etapa de desbaste y pulido, así como de la probeta en su estado original y después del ataque químico, esto será importante para dar el realismo deseado a la simulación del laboratorio.

4. Desarrollo

4.1 Modelado

Se empleó el software libre Blender para modelar los objetos con los que los usuarios interactuarán en el laboratorio virtual, utilizando técnicas *Low Poly* y texturas que minimizan la carga gráfica para poder agregar la mayor cantidad de elementos interactivos y con esto comenzar a atender el problema de disponibilidad del equipo en una misma instancia. En la Figura 2, se muestran los modelos 3D realizados para algunos componentes, donde se observa que habrá algunas diferencias menores con su contraparte real y se explican a continuación las razones de diseñarlos de esa forma. En el caso de la desbastadora, basado en la interacción real, se considera que nunca habrá una gran distancia entre los objetos y la cámara del jugador por lo que no se considera necesario modelarla hasta un Nivel de Detalle Bajo (LOD, por sus siglas en inglés), lo

cual favorecerá su rendimiento gráfico sin comprometer su operación. Para el microscopio, se combinó el enfoque *Low Poly* con la herramienta de esculpido para obtener las formas de mayor complejidad, así también se hizo una adaptación del tubo y oculares para ajustarse a las condiciones de uso de un ambiente virtual sin comprometer la visualización de la microestructura en el microscopio. Finalmente, el modelo de la probeta es esencialmente un cilindro que con el sombreado y texturizado adecuado recrea el aspecto visual de la probeta real, este método garantiza modelos con excelente calidad visual sin incrementar significativamente los recursos gráficos.



Figura 2. De izquierda a derecha, en la parte superior la desbastadora, microscopio, y probeta del laboratorio real, en la parte inferior sus modelos virtuales.

4.2 Algoritmos e Interacciones en el Mundo Virtual

Para desarrollar las interacciones del laboratorio, se utilizaron algunas de las funciones que ofrece la API del entorno inmersivo, las cuales pueden ser integradas desde el motor gráfico (VRChat y Unity para este trabajo), la API incluye componentes prefabricados y cuyo código de programación puede modificarse utilizando el lenguaje de programación propio de VRChat, U# (Udon Sharp), que se basa en C#.

Se programaron diversos componentes para otorgar comportamientos específicos a objetos como contenedores de líquidos, tijeras y lijas, basándose en la observación de su comportamiento en la vida real. Para implementar estos comportamientos se utilizaron componentes como *Rigid Body* para otorgar física a los objetos, y *Box Collider* y *Mesh*

Collider para detectar colisiones entre objetos y activar eventos; se describen a continuación algunos ejemplos representativos.

La interacción entre los colisionadores de una lija y una probeta activa la función nativa de Unity *OnTriggerEnter*, la cual se programó para cambiar una variable de desgaste dentro del script de la probeta, además de activar un sistema de partículas cuando estos dos objetos entran en contacto. En la Figura 3 se muestra el prefabricado de la lija con sus componentes, donde se destacan los *box colliders* de apoyo para las interacciones y la función vacía *Placeable*, ésta solo funge como etiqueta para que un objeto se pueda colocar en un lugar, no tiene código propiamente; en el código *Event Caller On Hold On Drop* se programó la lógica para lanzar los eventos que permiten colocar un objeto en un lugar específico, es decir, fijar el objeto, y *Lija Circular Behaviour* sirve como etiqueta para identificar los objetos que son lija y el tamaño de lija para corresponder a las variantes disponibles en la práctica real.

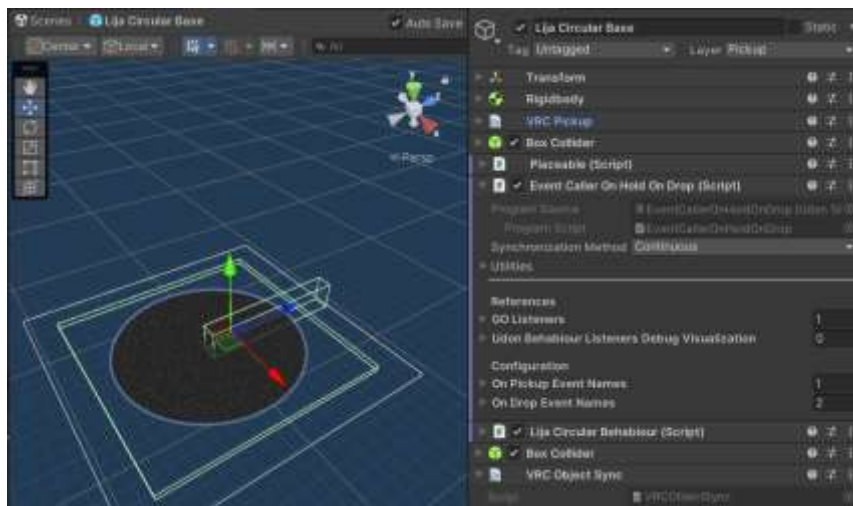


Figura 3. Lija con sus componentes, visualización en la interfaz de desarrollo de Unity, a la derecha se observa la ventana de inspección con todos los parámetros del objeto en cuestión.

Los *Snappers* son componentes que se programaron para colocar un objeto en una posición de referencia al detectar la colisión dentro de un radio definido con la función *OverlapSphere*, y después identificar si la posición es válida para ese objeto. Esta función es fundamental para facilitar la operación de las actividades en el laboratorio, ya que permitirá al usuario colocar en el espacio los objetos virtuales de forma imprecisa y que por programación estos se reposicionen donde les corresponde, generando una realimentación visual para que el usuario identifique y asimile la correcta colocación de cada uno, promoviendo así que en la práctica real realice el proceso correctamente.

Otra estrategia que se siguió en la programación fue el asignarle propiedades a un objeto para que tuviera posibilidad de ser sujetable, o no, situacionalmente, lo que facilita el manejo de objetos cercanos entre sí y evita que el usuario elija un objeto que no requiere operar en ciertos momentos del desarrollo de la práctica. Para lo referente a la simulación de las sustancias y su interacción entre objetos, se programaron colisiones, ya que todos los líquidos implementados se basan en sistemas de partículas, para lo cual se activan las colisiones del sistema asociado a cada líquido y se le asigna una etiqueta en un objeto padre para determinar durante la ejecución el tipo de líquido que está entrando en contacto con la probeta virtual, esta etiqueta es un dato de tipo *string* dentro de código, que se compara dentro de la función nativa de Unity *OnParticleCollision*, la cual está programada para detectar el tipo de objeto, y modificar indicadores booleanos dentro del mismo, esto permitió que en el laboratorio virtual se pueda diferenciar entre alúmina gris, blanca y nital durante la ejecución.

Para el funcionamiento de la probeta, se creó un efecto de sombra (*shader*) en el motor gráfico mediante el uso de la herramienta *ShaderGraph* que modifica la textura de la probeta, la cual se generó previamente en el software de modelado. Modificar la textura de la cara de la probeta permitió dar el efecto visual de desbaste, lo cual se recrea en el simulador cuando la probeta entra en contacto con una lija o estuvo en contacto con ésta, y actualizando las variables del *shader* creado.

4.3 Integración de los sistemas

Una vez que se elaboraron todos los modelos y se programaron las interacciones necesarias para replicar la práctica de metalografía, se procedió a construir *prefabs* de cada instrumento. Un *prefab* es un objeto virtual que contiene los componentes necesarios para realizar interacciones predeterminadas, facilitando así su replicación y distribución dentro de la escena, con ello se construyó la escena del laboratorio virtual, quedando como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Espacio del laboratorio virtual, considerando dimensiones de pasillos y múltiples mesas de trabajo con los diferentes instrumentos necesarios.

5. Resultados

5.1 Secuencia de actividades en el laboratorio virtual

Para probar las interacciones, repetibilidad, y estabilidad del laboratorio virtual, el equipo de desarrollo realizó múltiples ejecuciones siguiendo los pasos descritos para las actividades de la práctica de metalografía en la que se basa este trabajo; tal secuencia de acciones se describe a continuación.

Un elemento básico de un ambiente virtual es el punto de aparición del usuario, que es donde aparecerá su avatar (su representación virtual) y que se determinó fuera exterior al laboratorio para generar al usuario un sentido de exploración, al poder observar primero el lugar al que había ingresado y situándolo frente a la puerta del laboratorio, promoviendo así la interacción de desplazamiento y comenzando con la inmersión al espacio. Una vez dentro del laboratorio, el usuario tiene la capacidad de tomar alguna probeta para realizarle el ensayo metalográfico. Ya que ha elegido alguna, se dirige a cualquiera de las estaciones de trabajo en donde se encuentran los instrumentos e insumos necesarios para realizar la práctica, como son las desbastadoras, tijeras, y lijas interactivas. Estos pasos se muestran en la figura 5.

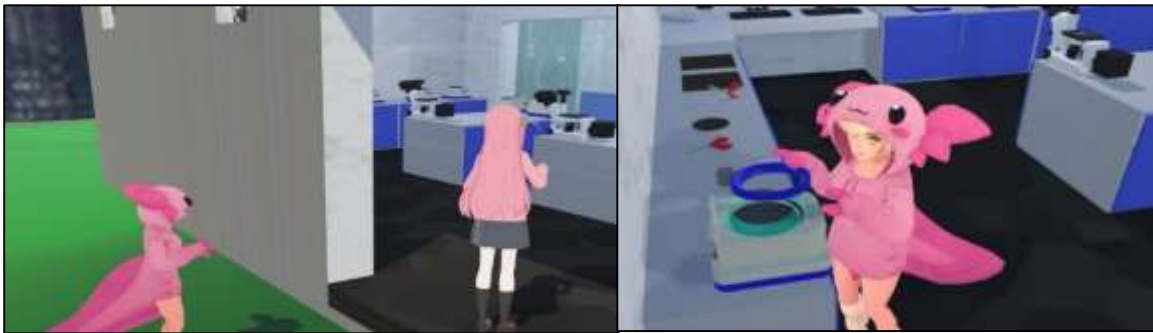


Figura 5. A la izquierda, avatares de dos usuarios ingresando al laboratorio desplazándose desde el punto de aparición; a la derecha un usuario frente a la estación de trabajo donde se encuentran los materiales para comenzar la práctica. Punto de vista en tercera persona.

Como siguiente paso, el usuario prepara el sistema para desbaste de la probeta, lo cual se realiza al interactuar con la lija y las tijeras, para colocar el objeto resultante en el equipo y una vez que éste es asegurado, con la interacción correspondiente queda listo para la siguiente fase del proceso, como se muestra en la figura 6.

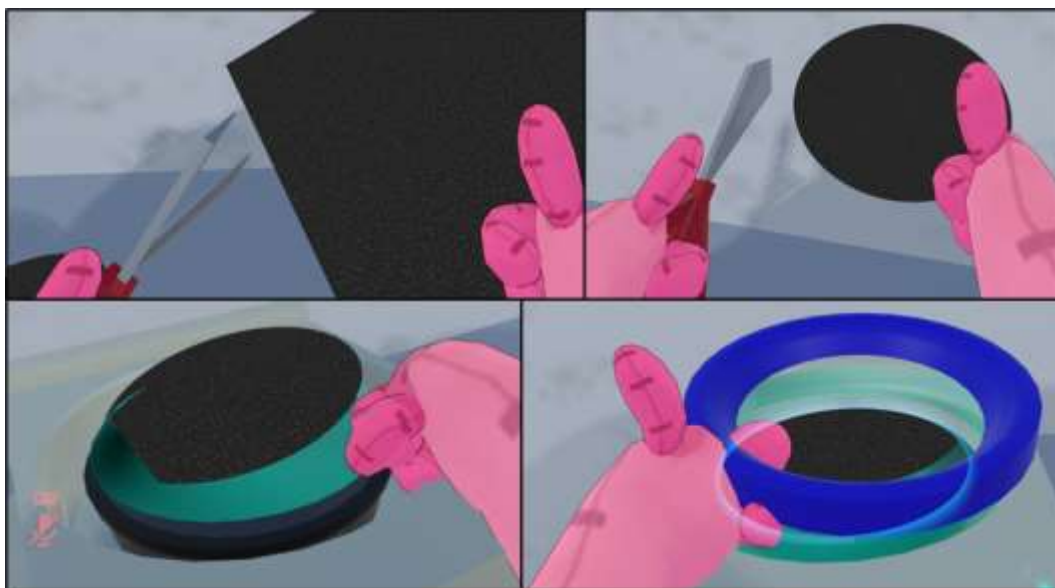


Figura 6. En la parte superior, interacción entre objetos para corte de lija; en la parte inferior, colocación de la lija en la desbastadora. Nótese el punto de vista en primera persona donde se visualizan las manos del avatar realizando las acciones. Imágenes tomadas con equipo inmersivo.

Ya colocada la lija, se enciende la desbastadora mediante un par de botones colocados fielmente con respecto a su ubicación en el instrumento real. Para realizar el procedimiento propiamente, se toma un contenedor con agua para refrigerar y limpiar la probeta mientras se esté lijando, la probeta se coloca sobre la desbastadora en funcionamiento hasta tener un desbaste homogéneo (visible por el efecto añadido con texturas), posteriormente se coloca otra lija más fina, y se repite este procedimiento hasta usar la lija más pequeña indicada en el manual. (Figura 7)



Figura 7. A la izquierda, interacción de encendido de la desbastadora, a la derecha desbaste de la probeta mientras se refrigera, nótese el efecto de chispas añadido para similitud con el suceso real.

Ahora, se repite el procedimiento en la desbastadora, pero cambiando el agua por alúmina gris y alúmina blanca en cada iteración, y cambiando las lijas por paños; posteriormente se utiliza nital sobre la cara procesada de la probeta y con la pistola de calor se realiza la interacción para secarla. Finalmente, la probeta se coloca en el microscopio para ser analizada. Estos pasos se muestran en la figura 8.



Figura 8. De izquierda a derecha: pulido, ataque químico, y colocación en microscopio.

Una vez que la probeta se encuentra fija en la posición correcta en el microscopio, se puede observar la microestructura generada realizando una acción similar a la que se haría en un laboratorio físico, se debe acercar la vista al ocular para poder ver a través del lente, lo que se muestra es la imagen de una metalografía real del banco de imágenes del equipo de desarrollo y que se agregó como textura a un plano para representar esta interacción, favoreciendo así la similitud con las acciones que se realizaran realmente y agregando con esto aún mayor inmersión a la experiencia educativa al usar este simulador. Adicionalmente, ya que la interacción inmersiva pueda replicarse fácilmente en cualquiera de las versiones de ejecución de la plataforma, si para el usuario fuera complicado asimilar esta acción, se agregó la opción de activar una pantalla de visualización externa de lo mismo que se visualiza en el microscopio. Estas acciones se muestran en la figura 9.

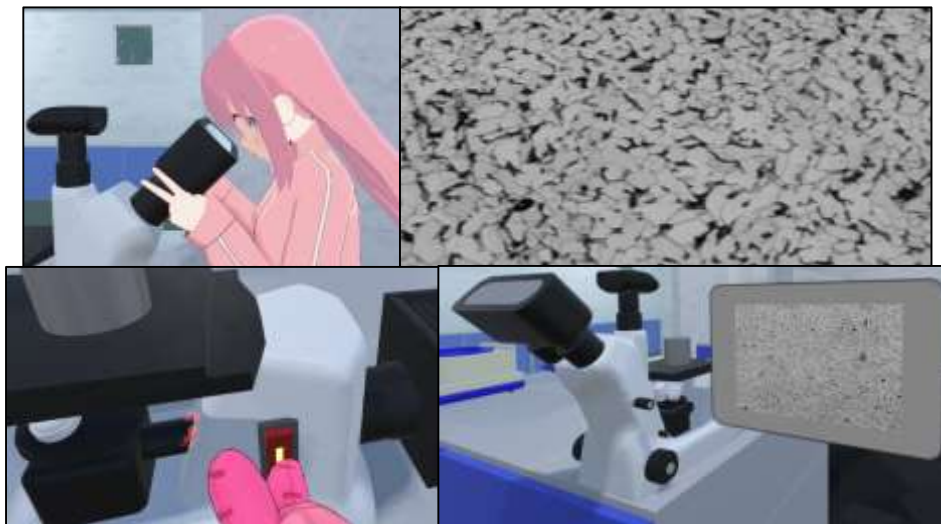


Figura 9. En la parte superior izquierda, avatar utilizando el microscopio, a la derecha lo que se visualiza en el ocular del microscopio; en la parte inferior izquierda, interacción de encendido de la pantalla complementaria, a la derecha visualización externa del microscopio.

5.2 Análisis de resultados

Gracias a la adecuada selección de las herramientas de desarrollo, se logró la construcción del entorno virtual deseado, en donde al combinar los recursos preprogramados y crear los necesarios para ajustar las interacciones para que fueran lo más cercanas al desarrollo de la práctica en el laboratorio real, se lograron replicar todos los elementos, instrumentos y actividades que se desarrollan conforme a lo descrito en el manual de referencia. Sin embargo, desde el punto de vista puramente del cómputo espacial, los códigos elaborados también presentaron desafíos al programar las interacciones debido a que el lenguaje propio del entorno inmersivo sigue en desarrollo y aún no soporta todas las funciones típicas en el manejo de otros lenguajes más generales, este fue el caso específico del manejo de listas, clases genéricas, herencia, polimorfismo y algunas funciones avanzadas de programación. El laboratorio virtual resultante de este trabajo es completamente funcional, interactivo, con alto grado de similitud con su contraparte real, cuenta con la capacidad de poder escalarse para tener más equipos simulados en una misma instancia gracias al desarrollo de sus propios elementos prefabricados, lo cual se demuestra al haber colocado múltiples equipos en el espacio base de trabajo, atendiendo así la limitante de equipos disponibles. Se adiciona a lo anterior la posibilidad de que múltiples usuarios accedan al mismo laboratorio virtual para interactuar entre sí y con esto promover la socialización, que siempre es importante en el ámbito educativo, permitiendo así que profesores y alumnos ingresen a un mismo espacio virtual para simular una clase práctica como tal. Se realizaron pruebas de desempeño en los tres dispositivos disponibles a través de la plataforma inmersiva, y si bien los mecanismos de entrada para las interacciones son diferentes (pantalla táctil, teclado/mouse, controles propios del visor), en todos fue posible realizar todas las actividades que indica el manual de referencia; así también se identificó que, gracias a la correcta depuración gráfica, no había pérdida de cuadros en el renderizado en ningún equipo por lo que el usuario tendrá siempre una experiencia fluida y sin contratiempos técnicos al hacer uso del recurso creado.

6. Conclusiones

A través del uso de herramientas emergentes, como las que corresponden al cómputo espacial, surge la oportunidad de plantear nuevos simuladores educativos con un mayor grado de similitud a los elementos con los que se interactúa, con diferencia de los simuladores disponibles en los que se suelen utilizar abstracciones para representar ciertos componentes, esto se debe principalmente a que no han sido desarrollados desde un punto de vista gráfico. Considerando que cognitivamente las personas tienen una asimilación principalmente visual, surge la relevancia de utilizar estos nuevos paradigmas de la virtualización en favor de ofrecer a los estudiantes nuevas herramientas que les

permitan familiarizarse con la apariencia de los elementos e instrumental que usarán en aplicaciones reales. Este trabajo deja evidencia de cómo pueden usarse modeladores y motores gráficos en pro de la productividad para dar un nuevo nivel de innovación a la creación de simuladores educativos en forma de espacios virtuales inmersivos. La virtualización de este tipo de entornos presenta a los usuarios escenarios de experimentación previa para a su curva de aprendizaje en un tema determinado, permitiéndoles equivocarse naturalmente por la inexperiencia esperada al ser la primera vez que se enfrentan a procesos de esta naturaleza, sin que estos errores representen costos derivados de los consumibles necesarios o de la reparación de equipo al dañarlo. Al poder aprender y mejorar su técnica en el uso de los elementos para realizar el ensayo metalográfico virtualmente se promueve que al ingresar a un laboratorio real exista una mejora en el aprovechamiento de los recursos reales, lo que se traducirá en beneficios para el propio laboratorio. El laboratorio virtual representa un recurso atemporal para que los estudiantes puedan ingresar posteriormente a la realización de la práctica y reafirmar los conceptos estudiados, lo cual es muy complicado de realizar en un espacio físico.

6.1. Agradecimientos

Al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación, PAPIME con clave PE103324, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

7. Referencias

[1] Yin, X., Zhang, J., Li, G., & Luo, H. (2024). Understanding Learner Satisfaction in Virtual Learning Environments: Serial Mediation Effects of Cognitive and Social-Emotional Factors. *Electronics*, 13(12), 2277. <https://doi.org/10.3390/electronics13122277>

[2] García, N. R. P., Parrales, E. M. B., Cantos, M. A. B., & Ponce, M. R. M. (2024). Integración de la Inteligencia artificial en la formulación de proyectos: Oportunidades, desafíos y perspectivas futuras. *RECIAMUC*, 8(1), 463-477. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/8.\(1\).ene.2024.463-477](https://doi.org/10.26820/reciamuc/8.(1).ene.2024.463-477)

[3] Simulaciones y Proyectos. (2022, 17 enero). *FLOW-3D Cast® | Software de fundición de metal*. RDT SIMULATION. <https://www.simulacionesyproyectos.com/software/flow-3d-cast-software-de-simulacion-de-fundicion/>

[4] Ortiz, P.A., Márquez, A. U. E., Barba, P. A., & Romero, H. J. L. (2020). [Manual de prácticas del laboratorio de materiales I, \(Versión 01\).](https://www.ingenieria.unam.mx/labsmateriales/docs_calidad/manuales/Manual_LabMaterialesI.pdf) [https://www.ingenieria.unam.mx/labsmateriales/docs_calidad/manuales/Manual LabMaterialesI.pdf](https://www.ingenieria.unam.mx/labsmateriales/docs_calidad/manuales/Manual_LabMaterialesI.pdf)

Estrategia de aprendizaje en los símbolos de los elementos químicos de la tabla periódica

Chávez, M. M.¹, Plaza, H. B.¹, Salcedo, L. M. C.², Hernández, M. L.¹,

Soto, T. M. L.¹, Goñi, C. H. B.¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, CBI, Área de Química, CDMX, México

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, USAI, DRX, C. U., CDMX, México

³Estudiante de Ingeniería Química, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, CDMX, México

cmm@azc.uam.mx, al2152003660@azc.uam.mx, cecy1269@yahoo.com.mx, hml@azc.uam.mx

mlst@azc.uam.mx, gch@azc.uam.mx

1. Resumen

Uno de los deberes docentes es crear actividades que mantengan motivados a sus estudiantes en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Dependiendo del tema y de los propósitos pedagógicos que se persigan, es indispensable generar estrategias didácticas convenientes o apropiadas en la programación de sus clases. En este trabajo se presenta una estrategia novedosa en el aprendizaje de los símbolos de los elementos químicos de la tabla periódica. Por lo que fue creado un material didáctico. Para este fin se utilizó el Teorema de Zeckendorf basado en la Sucesión de Fibonacci. Se generaron 10 tarjetas que contienen todos los símbolos de los elementos químicos colocados bajo esta sucesión. La actividad consiste en que el aprendiz piense en un símbolo de un elemento químico, luego debe separar las tarjetas en las que aparezca el símbolo que pensó y las entrega al profesor. El profesor acertadamente adivinará el nombre de ese elemento químico que solamente el aprendiz conocía.

2. Introducción

2.1 Fibonacci y Zeckendorf

Leonardo de Pisa Fibonacci (1170-1240) fue el matemático italiano de mayor talento de la Edad Media y Édouard Zeckendorf (1901-1983) fue médico, oficial y coronel de ejército, matemático aficionado belga. Ambos se dedicaron al estudio de los números por situaciones cotidianas de contar, ordenar e interpretar. Sus estudios y análisis de la numeración los llevo a realizar sucesiones o secuencias. Así, ellos lograron identificar regularidades en los números^[1].

En la actualidad la secuencia de Fibonacci y el Teorema de Zeckendorf ayudan a dar sentido de la aritmética y el sistema de la numeración aplicándolo a la contabilidad comercial, conversión de pesos y medidas, cálculo, intereses, cambio de moneda y otras numerosas aplicaciones en ciencias de la computación y teoría de juegos^[2,3].

Para el estudio y comprensión de la física y de la química es indispensable tener bases sólidas en matemáticas, para ello resulta inspirador la maravilla de la secuencia de Fibonacci y el teorema de Zeckendorf pues también se manifiestan en la naturaleza. Por ejemplo, en el modo en que crecen las ramas de un árbol, como se va generando un panal de abejas, o tal como fue origen con Fibonacci, al querer saber el número de parejas de conejos que se reproducirán en un cierto tiempo^[4,5].

En el estudio de diversos temas de química, es fundamental conocer el símbolo de cada uno de los elementos químicos. Para esto siempre se ha recurrido a diversas estrategias de aprendizaje, por lo que en este trabajo se pretende mostrar una táctica novedosa aplicando el teorema de Zeckendorf basado en la secuencia de Fibonacci.

2.2 Secuencia de sucesión de Fibonacci

Es una serie infinita de números naturales que empieza con los números cero y uno, luego continúa añadiendo números que son la suma de los dos anteriores. Los dos primeros números son 1, luego 2 (1+1), después 3(1+2), 5(2+3) y así sucesivamente: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144^[5]. La tabla 1 muestra la secuencia de Fibonacci que será útil la construcción de las tarjetas mágicas de adivinación de todos los elementos químicos de la tabla periódica, la cual tiene 118 elementos.

Tabla 1. Parte de la secuencia de Fibonacci.

0	+	1	=	1
1	+	1	=	2
2	+	1	=	3
3	+	2	=	5
5	+	3	=	8
8	+	5	=	13
13	+	8	=	21
21	+	13	=	34
34	+	21	=	55
55	+	34	=	89
89	+	55	=	144

Los términos de la sucesión de Fibonacci se definen usualmente como lo muestran las ecuaciones 1 y 2^[5].

$$f_0 = 0, f_1 = 1; \text{ y } f_{n+2} = f_{n+1} + f_n \text{ cuando } n \geq 0 \quad (1)$$

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \quad (2)$$

Esta serie aparece en las diagonales del Triángulo de Pascal y también está muy relacionada con los números primos.

2.3 El teorema de Zeckendorf

Representa todo número natural con la suma de un cierto número de elementos de la sucesión de Fibonacci. Por ejemplo, $9 = 8 + 1$; $20 = 13 + 5 + 2$, etc^[6].

Así es posible asociar a la sucesión de los 20 primeros enteros. La distribución de los elementos químicos en las tarjetas mágicas se logró aplicando el teorema de Zeckendorf.

Para entender como el profesor adivinó el símbolo que pensó su alumno. Además, el profesor aplico esta actividad a varios de sus estudiantes y siempre logró adivinar. Primero aplico el teorema de Zeckendorf que establece que *“Todo número entero positivo puede representarse de forma única como la suma de números de Fibonacci. Esto es, elementos de la sucesión de Fibonacci distintos, de tal forma que dicha representación no contiene dos números de Fibonacci consecutivos”*^[7].

La actividad de enseñanza-aprendizaje mostrada en este trabajo parece ser mágica porque estas 10 tarjetas serán utilizadas de tal manera que sorprenderá a todos los alumnos. Parecerá que el profesor tiene un don de adivinación al aplicar este mecanismo de aprendizaje. La pregunta es, cómo el profesor sabe lo que los alumnos exactamente piensan sin equivocarse. Esto llevará a una inquietud por parte de los alumnos, por saber cómo logra hacer esto el profesor.

3. Condiciones experimentales

En este sentido, el orden de trabajo llevado a cabo se puede describir por etapas de desarrollo.

3.1 Planteamiento y construcción de las tarjetas

Los elementos químicos de la tabla periódica están colocados consecutivamente por su número atómico desde el número 1 hasta el 118. Por ese número atómico fue posible generar las 10 tarjetas mágicas, pero de cierta manera se oculta el número atómico y la atención se centra hacia los símbolos de los elementos químicos.

Para la elaboración de las tarjetas primero se debe descomponer cada número atómico en sus números de Zeckendorf correspondientes. Primeramente, se debe limitar los números de la secuencia que se empleará para trabajar dentro de la secuencia de Fibonacci como la secuencia de trabajo^[8,9,10,11].

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89

Si se continua ésta secuencia seguiría el 144 y este número ya supera el número atómico más alto conocido hasta ahora que es el 118 que corresponde al elemento químico Oganesson. Repetir el número 1 no tiene ningún uso, por lo tanto, solo se emplearán 10 números de la secuencia, empezando por el segundo 1, quedando como sigue:

1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89

Para fines didácticos, la forma de descomponer cada número atómico de la tabla periódica, es elegir tres números atómicos, por ejemplo: el 4 Berilio (Be), 28 Níquel (Ni) y el 100 Fermio (Fm).

Empezando con el Berilio le corresponde el número atómico 4, ubicamos este número en la secuencia:

1, 2, 3, 4, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89

El número 4 se ubica entre el número 3 y 5, que es el tercero y cuarto número de la secuencia. Después se emplea el número inmediato inferior, en este caso sería el 3. Así, se resta este número 3 del original que es 4.

$$4 - 3 = 1$$

Se obtiene como resultado 1, el cual se encuentra en la secuencia de trabajo, entonces se termina el desglose de componentes. Por lo que el número 4 se compone de dos números de la secuencia, primero (1) y tercero (3).

El siguiente elemento es el Níquel, con número atómico de 28, se realiza el mismo proceso anterior, se ubica este número en la secuencia de trabajo:

1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 28, 34, 55, 89

El número 28 se ubica entre el séptimo (21) y octavo (34) números de la secuencia, luego se selecciona el inmediato inferior, que sería el séptimo (21), se realiza la resta, el resultado es 7.

$$28 - 21 = 7$$

El número 7 no se encuentra dentro de la secuencia de trabajo, por lo que se debe repetir el proceso anterior con este número resultante. Así, se ubica este número en la secuencia de trabajo:

$$1, 2, 3, 5, 7, 8, 13, 21, 34, 55, 89$$

Se encuentra entre el cuarto (5) y el quinto (8) números, se realiza la resta del número inmediato inferior:

$$7 - 5 = 2$$

Obtenemos el número 2, el cual se encuentra en la secuencia de trabajo. Se terminan las iteraciones obteniendo que el número 28 se compone con el segundo (2), cuarto (5) y séptimo (21) número de la secuencia de Fibonacci. Para comprobar esto solo basta con realizar la suma de los componentes obtenidos:

$$2 + 5 + 21 = 28$$

Por último, se buscan los componentes para el elemento con número atómico 100, que corresponde al Fermio. Se repite el proceso de buscarlo en la secuencia de trabajo, en este caso se encuentra por encima del último elemento que es el décimo (89):

$$1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 100$$

Se realiza la resta.

$$100 - 89 = 11$$

Se lleva a cabo el mismo proceso con el número obtenido, se coloca en la secuencia de trabajo:

$$1, 2, 3, 5, 8, 11, 13, 21, 34, 55, 89$$

El número 11 se encuentra entre el quinto (8) y el sexto (13), se realiza la resta con el número inmediato inferior:

$$11 - 8 = 3$$

Se obtiene el número 3 que, si se encuentra en la secuencia de trabajo, los componentes obtenidos, tercero (3), quinto (8) y decimo (89) se suman.

$$3 + 8 + 89 = 100$$

3.2 Construcción de las 10 tarjetas

Las tarjetas se construyeron colocando los componentes de cada elemento de la secuencia de trabajo, es decir, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, que corresponden a los elementos Hidrógeno, Helio, Litio, Boro, Oxígeno, Aluminio, Escandio, Selenio, Cesio y Actinio. Por lo que se generaron 10 tarjetas, cada tarjeta inicia con estos elementos. Esto es mostrado en la figura 1.

H ₁					He ₂					Li ₃					B ₅					O ₈				

Figura 1. Las 10 tarjetas generada por la descomposición de los primeros 10 elementos químicos bajo el Teorema de Zeckendorf.

Para ir acomodando cada elemento en las tarjetas, se realizó la descomposición por componentes, para el elemento Berilio con numero atómico 4, se tiene que los componentes eran el primero (1) y tercero (3), siguiendo lo anterior las tarjetas 1 y 3 contendrán todos los elementos que contengan el primer y tercer componente de la secuencia de trabajo, resultando lo que se presenta en la figura 2.

H₁ Be₄ Tarjeta 1	He₂ Ni₂₈ Tarjeta 2	Li₃ Be₄ Fm₁₀₀ Tarjeta 3	B₅ Ni₂₈ Tarjeta 4	O₈ Fm₁₀₀ Tarjeta 5
Al₁₃ Tarjeta 6	Sc₂₁ Ni₂₈ Tarjeta 7	Se₃₄ Tarjeta 8	Cs₅₅ Tarjeta 9	Ac₈₉ Fm₁₀₀ Tarjeta 10

Figura 2. Las 10 tarjetas generada por la descomposición de los primeros 10 elementos químicos bajo el Teorema de Zeckendorf, más Be₄, Ni₂₈ y Fm₁₀₀.

4. Resultados y discusión

Aplicando la descomposición en componentes para el resto de los números atómicos de los elementos químicos, las tarjetas que los contienen quedaron en las secuencias mostradas en la tabla 2.

Tabla 2. Secuencias de los números atómicos de los 118 elementos químicos contenidas en 10 tarjetas denominadas tablas de adivinación.

Tarjeta 1	Cont. Tarj. 1	Tarjeta 2	Tarjeta 3	Tarjeta 4	Tarjeta 5	Tarjeta 6	Tarjeta 7	Tarjeta 8	Tarjeta 9	Tarjeta 10
1	93	2	3	5	8	13	21	34	55	89
4	95	7	4	6	9	14	22	35	56	90
6	98	10	11	7	10	15	23	36	57	91
9	101	15	12	18	11	16	24	37	58	92
12	103	20	16	19	12	17	25	38	59	93
14	106	23	17	20	29	18	26	39	60	94
17	108	28	24	26	30	19	27	40	61	95
19	111	31	25	27	31	20	28	41	62	96
22	114	36	32	28	32	47	29	42	63	97
25	116	41	33	39	33	48	30	43	64	98
27		44	37	40	42	49	31	44	65	99
30		49	38	41	43	50	32	45	66	100
33		54	45	52	44	51	33	46	67	101
35		57	46	53	45	52	76	47	68	102
38		62	50	54	46	53	77	48	69	103
40		65	51	60	63	54	78	49	70	104
43		70	58	61	64	68	79	50	71	105
46		75	59	62	65	69	80	51	72	106
48		78	66	73	66	70	81	52	73	107
51		83	67	74	67	71	82	53	74	108
53		86	71	75	84	72	83	54	75	109
56		91	72	81	85	73	84		76	110
59		96	79	82	86	74	85		77	111
61		99	80	83	87	75	86		78	112
64		104	87	94	88	102	87		79	113
67		109	88	95	97	103	88		80	114
69		112	92	96	98	104	110		81	115
72		117	93	107	99	105	111		82	116
74			100	108	100	106	112		83	117
77			101	109	101	107	113		84	118
80			105	115	118	108	114		85	
82			106	116		109	115		86	
85			113	117			116		87	
88			114				117		88	
90							118			

Con los resultados de la tabla 2 fue posible la construcción de las 10 tarjetas mágicas de adivinación de los símbolos de los 118 elementos químicos de la tabla periódica los cuales quedaron como se exhibe en la figura 3.

H	Be	C	F	Mg	Si	Cl	K
1	4	6	9	12	14	17	19
Ti	Mn	Co	Zn	As	Br	Sr	Zr
22	25	27	30	33	35	38	40
Tc	Pd	Cd	Sb	I	Ba	Pr	Pm
43	46	48	51	53	56	59	61
Gd	Ho	Tm	Hf	W	Ir	Hg	Pb
64	67	69	72	74	77	80	82
At	Ra	Th	Np	Am	Cf	Md	Lr
85	88	90	93	95	98	101	103
Sg	Hs	Rg	Fl	Lv			
106	108	111	114	116			

Tarjeta 1

Li	Be	Na	Mg	S	Cl	Cr	Mn
3	4	11	12	16	17	24	25
Ge	As	Rb	Sr	Rh	Pd	Sn	Sb
32	33	37	38	45	46	50	51
Ce	Pr	Dy	Ho	Lu	Hf	Au	Hg
58	59	66	67	71	72	79	80
Fr	Ra	U	Np	Fm	Md	Db	Sg
87	88	92	93	100	101	105	106
Nh	Fl						
113	114						

Tarjeta 3

O	F	Ne	Na	Mg	Cu	Zn	Ga
8	9	10	11	12	29	30	31
Ge	As	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Eu
32	33	42	43	44	45	46	63
Gd	Tb	Dy	Ho	Po	At	Rn	Fr
64	65	66	67	84	85	86	87
Ra	Bk	Cf	Es	Fm	Md	Og	
88	97	98	99	100	101	116	

Tarjeta 5

Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
21	22	23	24	25	26	27	28
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Os	Ir	Pt
29	30	31	32	33	76	77	78
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
79	80	81	82	83	84	85	86
Fr	Ra	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc
87	88	110	111	112	113	114	115
Lv	Ts	Og					
116	117	118					

Tarjeta 7

Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm
55	56	57	58	59	60	61	62
Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
63	64	65	66	67	68	69	70
Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt
71	72	73	74	75	76	77	78
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
79	80	81	82	83	84	85	86
Fr	Ra						
87	88						

Tarjeta 9

He	N	Ne	P	Ca	V	Ni	Ga
2	7	10	15	20	23	28	31
Kr	Nb	Ru	In	Xe	La	Sm	Tb
36	41	44	49	54	57	62	65
Yb	Re	Pt	Bi	Rn	Pa	Cm	Es
70	75	78	83	86	91	96	99
Rf	Mt	Cn	Ts				
104	109	112	117				

Tarjeta 2

B	C	N	Ar	K	Ca	Fe	Co
5	6	7	18	19	20	26	27
Ni	Y	Zr	Nb	Te	I	Xe	Nd
28	39	40	41	52	53	54	60
Pm	Sm	Ta	W	Re	Tl	Bi	
61	62	73	74	75	81	82	83
Pu	Am	Cm	Bh	Hs	Mt	Mc	Lv
94	95	96	107	108	109	115	116
Ts							
117							

Tarjeta 4

Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca
13	14	15	16	17	18	19	20
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
47	48	49	50	51	52	53	54
Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re
68	69	70	71	72	73	74	75
No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt
102	103	104	105	106	107	108	109

Tarjeta 6

Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
34	35	36	37	38	39	40	41
Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In
42	43	44	45	46	47	48	49
Sn	Sb	Te	I	Xe			
50	51	52	53	54			

Tarjeta 8

Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm
89	90	91	92	93	94	95	96
Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf
97	98	99	100	101	102	103	104
Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn
105	106	107	108	109	110	111	112
Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og		
113	114	115	116	117	118		

Tarjeta 10

En la tabla 3 se puede observar que la secuencia de los símbolos de los elementos químicos de la tarjeta 7 es: del escandio Sc_{21} al arsénico As_{33} , del Osmio Os_{76} al radio Ra_{88} y del darmstadtio Ds_{110} al elemento 122. Con esto, se puede establecer que la secuencia es: Antes del Sc_{21} está el calcio Ca_{20} , que al sumar 13 se obtiene el As_{33} , luego se suma el doble de 21, que es 42, se tiene que $42 + 33 = 75$, este número le corresponde al renio Re_{75} , entonces al sumar 13, se obtiene 88 que corresponde al Ra_{88} . Después $88 + 21 = 109$ que corresponde al Meitnerio Mt_{109} , que sumar 13 da 122, el elemento 122 no existe, pero esta es la secuencia. Es decir, si existieran los elementos 119 al 122, estarían colocados en la tarjeta 7. Esta misma observación se puede con los resultados de la tabla 3 con otras tarjetas y la secuencia en cada una de ellas es diferente. Por lo que no puede haber error y se puede confiar en la adivinación de cada símbolo de cualquier elemento químico.

4.1 Demostración de la actividad

Para demostrar cómo funcionan las tarjetas, por ejemplo, el elemento elegido y secreto por el aprendiz será el Oro Au_{79} . Después, se le pide al aprendiz que separe las tarjetas en las que aparece el símbolo de este elemento químico, el cual resultó estar en las tarjetas: 3, 7 y 9. Se suman los números atómicos del primer elemento químico colocado en la parte superior izquierda de estas tarjetas: $\text{Li}_3 + \text{Sc}_{21} + \text{Cs}_{55} = \text{Au}_{79}$. Así, es posible aplicarlo para cualquier símbolo de los elementos químicos de la tabla periódica.

En un grupo de 30 alumnos se formaron seis equipos, cada uno de cinco alumnos. Un alumno de cada equipo era el adivinador y los otros cuatro se encargaban de pensar en un símbolo en particular y guardarlo como secreto. Tanto el adivinador como los alumnos que guardaban en secreto el símbolo elegido, se dieron a la tarea por conocer el nombre de los elementos. Ambas partes, se percataron que para ganar en esta actividad era necesario saber el símbolo y el nombre de los elementos químicos.

Posteriormente, a los alumnos se les dio una explicación de como fueron creadas las tarjetas, resaltando la aplicación que tiene la teoría de números o sistemas de numeración. También se les comentó que esto fue posible porque los elementos químicos de la tabla periódica tienen un número atómico y están colocados en ella de manera consecutiva.

La estrategia de esta actividad es muy fácil aplicarla y divertida en una clase de 1:30 horas, que es el tiempo de una clase de Estructura Atómica y Enlace Químico que se imparte en el primer trimestre del tronco básico de las 11 carreras de ingeniería de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería (CBI) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

5. Conclusiones

Para la creación de un material didáctico, este debe ser novedoso, atractivo e impresionante, como lo fue en este caso, el cual llevo tiempo de investigación y de dedicación hasta obtenerlo, probarlo y comprobar que funcionara.

Se podría pensar que, para un nivel universitario, los alumnos ya deberían saber los símbolos de los elementos de la tabla periódica y que están colocados de forma consecutiva por su número atómico. Lo sorprendente es que no todos los alumnos proceden de un nivel medio superior que tenga relación con las ciencias básicas, matemáticas, física o química. Es decir, sus antecedentes académicos son en artes plásticas, turismo, administración, enfermería, gastronomía, entre otras. Por otra parte, aunque el área de concentración a nivel bachillerato de los alumnos tenga relación con las ciencias básicas, confunden los símbolos del magnesio con el manganeso, o el cobalto con el cobre, el yodo con el ytrio, la plata con el oro, el plomo con el polonio, el rodio con el rutenio, etc. Es por eso que fue creado este material didáctico como una estrategia de enseñanza-aprendizaje y hacer de él una actividad que lleve a la retroalimentación, en este caso, para el aprendizaje de los símbolos de los elementos químicos y su número atómico. Ya que esta es la puerta de entrada en todos los temas de química.

6. Bibliografía

1. Daini, Fabio; Andión, Ricardo (2003). *Fibonacci, La Serie Infinita.*: Pretince Hall.
ISBN 84-89660-00-X.
2. The Fibonacci Quarterly, Official Publication of the Fibonacci Association
<https://www.fq.math.ca/editors.html>
3. Zeckendorf E., Représentation des nombres naturels par une somme de nombres de fibonacci ou des nombres de lucas, Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, vol. 41, num. 3-4, 179–182, (1972).
4. López Sanz Patricia. La sucesión de Fibonacci. Editorial Círculo Rojo, Primera edición, ISBN 8491268987 Madrid, España (2016).
5. D. E. Daykin, Representation of natural numbers as sums of generalized Fibonacci numbers, Journal of London Mathematical. Society, vol 35, 143-160, (1960).
6. Zeckendorf representation *Encyclopedia of Mathematics*.
https://encyclopediaofmath.org/wiki/Zeckendorf_representation
7. Zeckendorf Demostración de la unicidad de la representación de Zeckendorf en PlanetMath <https://planetmath.org/ProofThatTheZeckendorfRepresentationOfAPositiveIntegerIsUnique.html>
8. Johnsonbaugh, Richard (2005). *Matemáticas Discretas*. Pearson Educación.

ISBN 970-26-0637-3.

9. Kenneth, H. Rosen (2003). *Discrete mathematics and its applications*. McGraw Hill. ISBN 0-07-123374-1

10. Kolman, Bernard; Hill, David R. (2006). *Álgebra Lineal*. Pearson Educación.

ISBN 970-26-0696-9.

11. Álvarez Josefina, Hughes Larry, Representación de los números naturales positivos, *Miscelánea Matemática*, Sociedad Mexicana de Matemáticas, 76, 21- 43, (2023).

Una primera aproximación a los mecanismos de transferencia de energía

García - Romero E.L.¹, Barrientos - Cruz A.A.¹, Pérez - Salas K.Y.², Aguayo J.P.²

¹ Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Ciudad de México 04510, México.² Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Ciudad de México 04510, México.

erika.garcia@icat.unam.mx

alexa.barrientos@icat.unam.mx

karen.perez@icat.unam.mx

pablo.aguayo@icat.unam.mx

1. Resumen

La transferencia de energía se fundamenta en los mecanismos de conducción, convección y radiación, los cuales pueden darse de forma individual o simultánea. Con el fin de visualizar los tres mecanismos y reforzar el aprendizaje de la transferencia de energía, se realizaron experimentos de cada uno con uso de la cámara termográfica: el calentamiento de una varilla de metal para conducción, la interacción de una vela encendida y el movimiento de un anemómetro para convección y el calentamiento de glicerina y cuadros de papel de colores (en ambos casos) por medio de radiación solar.

2. Introducción

La palabra energía viene del griego *energeia* que significa “fuerza de acción” o “fuerza de trabajo”, este concepto fue introducido por Sir. Isaac Newton en los años 1600, a partir de la formulación de su hipótesis sobre la energía potencial (asociada con la posición de un sistema físico o cuerpo) y la energía cinética (asociada con el movimiento de un sistema físico o cuerpo)^[1]. Actualmente, la energía es definida como la capacidad de un sistema para realizar un determinado trabajo^[2]. En la naturaleza existen varios tipos de energía, por ejemplo: la energía mecánica, electromagnética, química y térmica.

Particularmente, la energía térmica se define como la energía cinética de las partículas que se mueven, chocan y vibran dentro de un objeto, y se puede cuantificar por medio de la temperatura^[1]. Cuando un cuerpo se encuentra a temperaturas altas, sus partículas se mueven más rápido, mientras que un cuerpo con menor temperatura, las partículas se mueven más lento.

De igual modo, el calor es un concepto que se encuentra muy relacionado con la diferencia de temperatura. En termodinámica, el calor se define como el flujo de energía térmica^[3], es decir, es la transferencia de la energía térmica de un cuerpo con el sistema hasta que alcance el equilibrio térmico, el cual se alcanza cuando los cuerpos se encuentren a las mismas temperaturas.

Alrededor del siglo V a.C. algunos filósofos presocráticos (Parménides, Empédocles y Anaxágoras) propusieron en el pensamiento griego la idea de “*nada nace ni perece*”^[4]. Una forma moderna de entender esto está en el principio de conservación de energía el cual indica que *la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma*, el cual es un principio fundamental en la teoría de calor. Dicha transformación se da en la mayoría de los procesos naturales y tecnológicos, por ejemplo, cuando la energía eléctrica se transforma en energía térmica en una resistencia. En muchos de estos procesos, la energía se transforma mientras es transferida de un lugar a otro, tomando como ejemplo la transferencia de energía del sol a la tierra a través de la radiación electromagnética. Son los mecanismos de transferencia de energía las formas en que se puede transferir la energía térmica entre objetos. Existen tres mecanismos principales^[5]: conducción o difusión térmica, convección y radiación térmica.

La conducción o difusión térmica, consiste en transmitir la energía por medio del contacto entre las partículas más energéticas hacia las partículas de menor energía que se encuentran en la sustancia, cuerpo o medio. La conducción se puede dar en gases, líquidos y sólidos^[6].

Dentro de los sólidos, las moléculas tienen un movimiento mucho más restringido, entonces, son las vibraciones moleculares las responsables de transmitir la energía, un caso particular de esto son los metales, en los cuales los responsables de transmitir la energía son los electrones libres^[6]. Para el caso de líquidos y gases, la conducción se debe a colisiones entre las moléculas, provocadas por el movimiento browniano^[7], el cual, es el tránsito continuo y aleatorio de las moléculas.

Para cuantificar la transferencia de calor de un material o medio a través de conducción, se considera la Ley de Fourier. Esta ley nos expresa que el flujo de energía depende de cuatro factores: la diferencia de temperaturas ($T_2 - T_1$), el espesor o ancho del material (δ) y de la conductividad

térmica (k) de dicho material y del área (A) o superficie expuesta a la transferencia de energía. Una forma simple de expresar esta ley es:

$$Q_{cond} = -k A \frac{T_2 - T_1}{\delta} \quad (1)$$

Por otro lado, la convección es un mecanismo de transferencia de energía en el cual tiene que existir un fluido en movimiento, es decir, tiene que existir un flujo, y es común en ingeniería hablar de la convección interfacial, la cual ocurre entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que están en movimiento^{[8][6]}. Puede haber una transferencia entre dos cuerpos, pero debe presentarse una corriente de gas o fluido en movimiento. En caso de ausencia de la corriente en movimiento, la transferencia de calor sería por conducción únicamente. El mecanismo de convección es una de las formas más eficaces, ya que se mantiene un amplio gradiente de temperatura entre el cuerpo y el aire o la corriente de líquido que se mueven^[8].

Es importante mencionar que, existen dos tipos de convección dependiendo de la causa del movimiento del fluido, ya sea líquido o gas, en cuestión. Se le conoce como convección forzada cuando el fluido es forzado a fluir mediante fuerzas externas, por ejemplo, el viento o un ventilador. Por otro lado, se encuentra la convección natural (o convección libre) que se identifica cuando el movimiento del fluido se genera a partir de una diferencia de densidades por causa de una variación de temperatura en el fluido en movimiento.

Se utiliza la ecuación de la ley de enfriamiento de Newton para conocer la rapidez de la transferencia de energía por convección a través de una interfase^[9]. Esta ley explica que el calor transferido es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie T_s y el fluido T_∞ , siendo h el factor de proporcionalidad y se le conoce como el coeficiente convectivo de transferencia de energía. Este coeficiente no es una propiedad propia del fluido como la conductividad térmica k , sino que se debe determinar experimentalmente y puede depender de diversos factores como la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, propiedades y velocidad del fluido^[6], así como de la misma diferencia de temperaturas^[9].

$$Q_{conv} = h (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Por último, la radiación térmica se define como la energía emitida en forma de ondas electromagnéticas debido a la temperatura que presentan los cuerpos u objetos que conforman la materia, ya que todos los cuerpos que se encuentren por arriba del cero absoluto (-273°C) emiten radiación. La radiación térmica es un mecanismo de transferencia de calor, que no necesita un medio para transferir energía, es un mecanismo rápido y no presenta alteraciones o atenuaciones en el vacío^[6].

Asimismo, la radiación térmica se encuentra estrechamente relacionada con la radiación solar, ya que existe un balance de radiación entre la radiación térmica absorbida por la superficie terrestre proveniente del sol (ganancia), la radiación térmica emitida por la atmósfera de la tierra al espacio y superficie terrestre, y la radiación mitigada por dispersión^[10]. La radiación solar que es aquella emitida por el sol y propaga radiaciones a lo largo del espectro electromagnético, por lo que se presenta

diferentes tipos de radiaciones: Visible que se detecta como luz blanca, infrarroja y ultravioleta que son rayos invisibles a nuestros ojos.

Para cuantificar la transferencia de calor de un material o medio a través de radiación, se considera la ecuación de Stephan-Boltzmann. Esta ecuación nos expresa que la máxima potencia emisiva E_b , que es la energía radiante emitida por unidad de tiempo por metro cuadrado, de un cuerpo negro, objeto que absorbe todas las radiaciones que inciden sobre ella, es proporcional a la cuarta potencia a su temperatura absoluta T , y la constante de proporcionalidad es la constante de Stephan-Boltzmann.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

3. Condiciones experimentales

Una vez explicados los mecanismos de transferencia (conducción, convección y radiación), se diseñaron tres experimentos que tienen como propósito ilustrar cada mecanismo de transferencia de manera simple y entendible con el fin de identificar las características que exhibe cada uno y relacionarlos con diversas actividades en la vida cotidiana. A continuación, se presenta una breve descripción de cada caso de estudio.

Para el primer caso, se analizó la transferencia de energía por conducción. Como puede apreciarse en la figura 1a, el montaje experimental consistió en aumentar la temperatura de una varilla de metal en uno de sus extremos, dicho calentamiento se logró colocando una vela cuya flama estaba en contacto directo con la varilla. Se realizó un monitoreo de la temperatura en la varilla mediante una cámara termográfica, la cual permite distinguir los gradientes de temperatura.

Por otro lado, se estudió la transferencia de energía por convección. De acuerdo con la figura 1b, el arreglo experimental constó en colocar una vela encendida debajo de un anemómetro con el propósito observar el movimiento de las aspas debido al incremento de la temperatura. Al igual que en el caso anterior, se realizó un seguimiento del aumento de temperatura por la vela mediante una cámara termográfica y un monitoreo a la velocidad de las aspas por medio del medidor del anemómetro.

Para el caso de la transferencia de energía por radiación, se realizaron dos experimentos. En el primer experimento, se fijaron tres cuadrados de cartulina del mismo tamaño en una superficie al aire libre en un día soleado, cada cuadro siendo de un color diferente (negro, gris y beige claro), se expusieron de tal forma que, ninguno de los cuadros se encontrara bajo alguna sombra, por lo que fueron sometidos a las mismas condiciones de luz como se puede ver en la figura 1c. Por otro lado, se colocaron cinco vasos de precipitados de 20 mL que contenían la misma glicerina, sin embargo, cada uno fue identificado usando diferentes colorantes vegetales de color naranja, rojo, verde, azul y negro como se observa en la figura 1d. En ambos experimentos, se hizo un monitoreo de la temperatura y se tomaron fotografías por medio de la cámara termográfica.

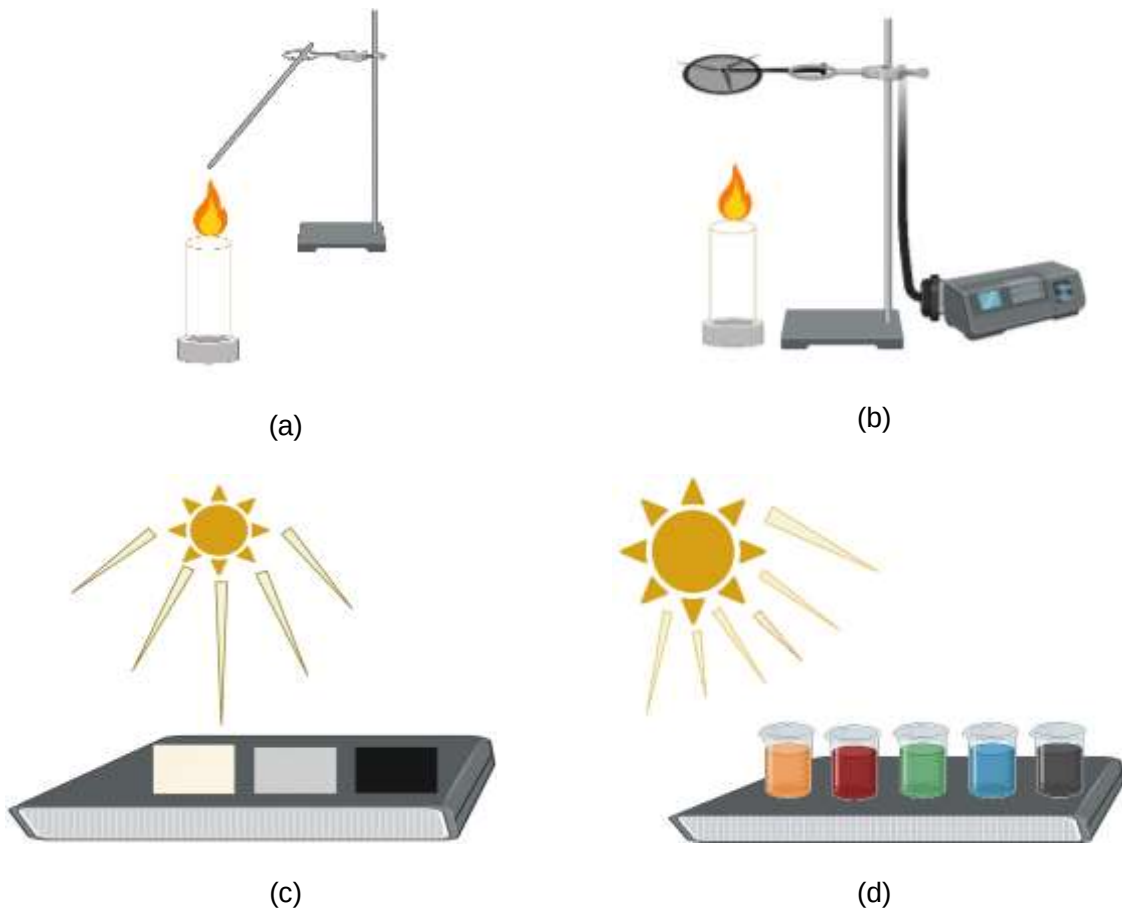


Figura 1. Experimentos de los mecanismos de transferencia: (a) Conducción, (b) Convección, (c) y (d) Radiación

4. Resultados y discusión

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos de las fotografías tomadas con la cámara termográfica de cada mecanismo de transferencia de energía.

Es importante destacar que cuando se toman fotografías con cámara termográfica, se visualiza regiones con colores diferentes dependiendo de la temperatura registrada, así que entre más brillante y claro sea el color, mayor es la temperatura de esa zona y, por el contrario, cuando el color de la región sea más oscuro y opaco, menor es la temperatura.

4.1 Conducción

La figura 2 muestra diferentes fotografías de la varilla calentándose a diferentes tiempos. La figura 2a corresponde al inicio del experimento, es decir, justo cuando la

flama empezó a calentar la varilla. La figura 2b corresponde a un tiempo mayor y así, sucesivamente hasta la figura 3d. Se puede apreciar que conforme transcurre el tiempo de contacto de la flama con la varilla, las zonas brillantes de la cámara termográfica van creciendo, es decir, van avanzado hacia el otro extremo de la varilla, el extremo alejado de la vela. Esto indica que efectivamente hay un transporte de calor desde el extremo caliente hacia el extremo frío, pero que dicho transporte requiere de un tiempo, el cual en gran medida dependerá de la conductividad, a que su vez, depende del movimiento molecular del material.

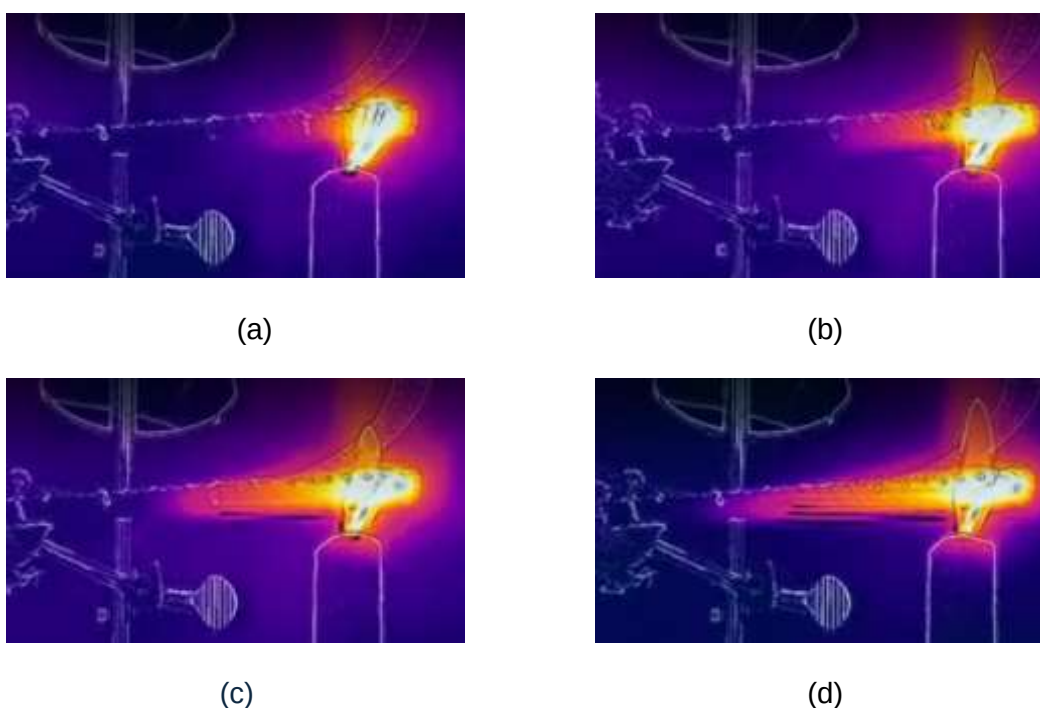


Figura 2. Termografías del experimento de transmisión de calor por conducción.

4.1 Convección

La figura 3 muestra un collage de los componentes involucrados en el experimento de convección. En el momento en que se coloca la vela encendida abajo del anemómetro, este tardó un poco de tiempo en girar y en registrar la velocidad. Una vez que empieza el movimiento, la cámara termográfica empieza a captar el aumento en la temperatura por medio de los cambios de los colores, y el medidor del anemómetro empezó a registrar velocidades cada vez mayores.

Ahora bien, el movimiento de las aspas es resultado del aumento de la temperatura provocado por la vela. Este aumento en la velocidad se debe a que el calor generado por la flama es mayor y se comprueba con el aumento de temperatura. Por lo tanto, se genera una diferencia de densidades en el aire entre la flama y el anemómetro que hace que las aspas del anemómetro se muevan, ya que el aire que se calienta por la vela sube por ser menos denso y el aire frío baja por ser más denso, por lo que, genera una corriente de aire que induce el movimiento. Por el hecho de que hay un aumento de temperatura y una diferencia de densidades da lugar a la convección natural.

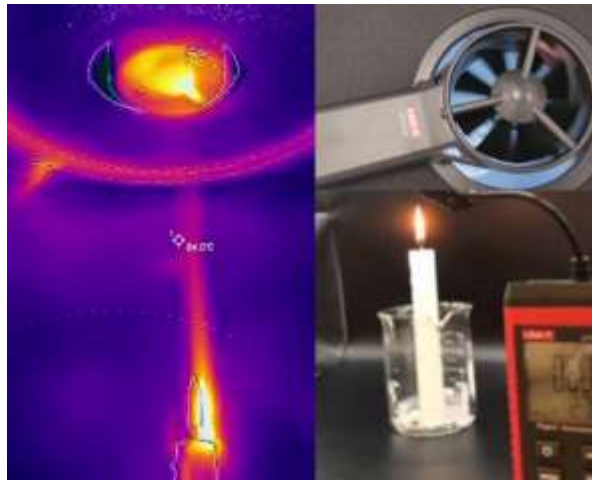


Figura 3. Ilustraciones del experimento de transmisión de calor por convección

4.3 Radiación

La figura 4 muestran tomas captadas con la cámara termográfica de cada experimento de radiación.

La figura 4a corresponde a las fotografías tomadas con la cámara termográfica del experimento de los cuadros de papel de color beige claro, gris y negro expuestos a los rayos del sol después de unos minutos. La región del cuadro beige se encuentra de un color oscuro opaco que define temperaturas bajas. Por otro lado, el cuadro gris corresponde a la región central de la foto, cuyo color es amarillo fuerte. Mientras que, el cuadro negro se localiza en la región más brillante de la foto.

La figura 4b corresponde a las imágenes capturadas con la cámara termográfica del experimento de los vasos con glicerina de color naranja, rojo, verde, azul y negro. Las regiones de los vasos naranja y rojo se encuentran de un color oscuro y opaco lo que corresponde a una menor temperatura. Mientras que, el vaso de color verde se muestra un poco más radiante que el rojo y naranja, por lo que, se cuenta a una temperatura

mayor. Por otro lado, los vasos de color azul y negro representan zonas más brillantes que las anteriores, siendo el color negro el más luminoso y de mayor temperatura de todos.

De acuerdo con estos resultados, los vasos de glicerina y los cuadros de papel se calientan por medio de radiación solar que reciben, ya que no hay ningún otro medio que les transfiera calor como en el caso de la varilla o el anemómetro. Sin embargo, los cuadritos de papel ni los vasos de glicerina no presentan la misma temperatura entre sí. Entonces, si los cuadritos de papel tienen la misma consistencia, rugosidad y son del mismo material, y la glicerina contenida en los vasos tiene las mismas propiedades, entonces, el color está jugando un papel muy importante en ambos experimentos.

Cuando asociamos los resultados anteriores con los datos de la longitud de onda del espectro visible de la Tabla 1^[11], se puede decir que los colores de menor longitud de onda como el azul y verde presentan mayor energía, lo cual se refleja por el aumento de temperatura y contrastan con las tomas de la cámara termográfica. En cambio, los colores naranja y rojo presentan una menor temperatura, por lo que, su energía disminuye al aumentar la longitud de onda.

Tabla 1. Longitud de onda del espectro visible

Color	Longitud de onda (nm)
Violeta	380-450
Azul	450-495
Verde	495-570
Amarillo	570-590
Naranja	590-620
Rojo	620-750

Los colores están relacionados con la transferencia de energía, ya que los colores oscuros, que poseen longitud de onda alta, absorben energía y se transforma en un aumento en su energía interna, por lo que representa un aumento de su temperatura. De acuerdo con Paminto et al.^[12], el color negro tiene un cambio de temperatura porque puede absorber la mayor parte del calor en poco tiempo, y no refleja la luz como tal.

Por otro lado, los colores claros reflejan la energía y absorben en menor proporción que los colores oscuros.



(a)



(b)

Figura 4. Termografías del experimento de transmisión de calor por convección

5. Conclusiones

Los mecanismos de transferencia de energía son conducción, convección y radiación, los cuales pueden estar presentes individualmente o interactuando uno con otro de acuerdo con la forma en que se transfiere la energía en el sistema. Por lo cual, es importante saber identificar cada mecanismo, no sólo de forma teórica sino aplicando el concepto de forma visual, lo cual puede ayudar en el aprendizaje y fundamentar mejor las bases de la transferencia de calor. El objetivo principal de este trabajo es el de ejemplificar los mecanismos, con el fin de que sean conceptos más tangibles, es decir, menos abstractos.

La conducción es un mecanismo que permite la transferencia de energía por medio del contacto de las moléculas de los cuerpos que se encuentran a diferente temperatura. Por ejemplo, pudimos observar que un extremo caliente de una varilla de metal, transfiere energía térmica hacia su extremo “frío”.

La convección es otro mecanismo de transferencia de energía entre un fluido en movimiento, ya sea líquido o gas. En el caso de la vela y el anemómetro, hay convección natural porque hay una diferencia de densidades del aire entre la vela y el anemómetro, y este cambio de densidades fue provocado por el calor que transmite la flama, por tanto, el flujo de aire que mueve al anemómetro fue provocado por la transferencia de energía.

La radiación térmica es un mecanismo de transferencia de energía de que no requiere un contacto entre objetos, ya que se da por ondas electromagnéticas y

diferencias de temperaturas. Al realizar los experimentos de los vasos de glicerina y cuadros de papel de colores (en ambos casos), se demuestra con la cámara termográfica que hay una transferencia de calor por radiación, sin embargo, el color juega un papel fundamental, ya que los colores con menor longitud de onda como el azul y el negro presentan una mayor absorción a la energía térmica, mientras que los colores de mayor longitud de onda como el rojo y naranja reflejan más la energía que la que absorben.

5.1. Agradecimientos

Erika Leticia García Romero agradece el financiamiento otorgado por CONAHCyT por la beca de maestría con CVU 1318948. Alexa Angeles Barrientos Cruz agradece el financiamiento otorgado por CONAHCyT por la beca de maestría con CVU 1323290. La Dra. Karen-Pérez agradece el financiamiento otorgado por CONAHCyT por la beca posdoctoral con CVU 779993. El Dr. Juan Pablo Aguayo Vallejo agradece a la DGAPA por el financiamiento del proyecto PAPIME PE106123.

6. Bibliografía

- [1] N. Belyakov, "Concept of energy", *Sustain. Power Gener.*, pp. 3–22, 2019, doi: 10.1016/b978-0-12-817012-0.00010-4.
- [2] Y. Demirel, *Energy. Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling*. London: Springer, 2006. doi: 10.2174/97816080528511060101.
- [3] R. Vijjapu y S. Tiwari, *Thermodynamics of Sensible Thermal Energy Storage Systems*, vol. 1–4. Elsevier Inc., 2022. doi: 10.1016/B978-0-12-819723-3.00149-9.
- [4] A. Bernabé Pajares, "La física de Empédocles y Anaxágoras", *Semin. Orotava Hist. la Cienc.*, pp. 71–95.
- [5] N. Belyakov, "Concept of energy", *Sustain. Power Gener.*, pp. 3–22, ene. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-817012-0.00010-4.
- [6] Y. A. Cengel y A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer Fundamentals and Applications*, Fifth Edit. Mc Graw Hill Education, 2015.
- [7] H. Mehrer y N. Stolwijk, "Heroes and Highlights in the History of Diffusion", *Basic Princ. Diffus. Theory, Exp. Appl.*, vol. 11, núm. 1, pp. 1–32, 2009, [En línea]. Disponible en: diffusion-fundamentals.org
- [8] I. Sokolova, "Temperature Regulation", *Encycl. Ecol. Vol. 1-4, Second Ed.*, vol. 3, núm. March 2018, pp. 633–639, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11129-7.
- [9] P. L. Dhar, *Review of Fundamentals*. 2017. doi: 10.1016/b978-0-12-809449-5.00003-6.
- [10] J. L. Hatfield, K. Togliatti, T. J. Sauer, y J. H. Prueger, *Radiation Balance*, 2a ed. Elsevier Ltd., 2023. doi: 10.1016/B978-0-12-822974-3.00040-9.

- [11] Instituto Nupef, “El Espectro Eletromagnético”, espectro.org.br Espectro e Redes Comunitárias. Consultado: el 24 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://espectro.org.br/es/content/el-espectro-eletromagnético>
- [12] J. Paminto, Fianti, y I. Yulianti, “The Effect of Surface Color on the Absorption of Solar Radiation”, *Phys. Commun.*, vol. 5, núm. 1, pp. 27–32, 2021.

Enseñanza de las ciencias a partir del relato histórico: de los primeros principios al cambio climático

Jaime-Mirabal, G.M.¹, Ladino-Luna, D.², Sánchez-Riesgo, D.³

^{1,3}CES, Universidad de Pinar del Río, Martí No. 300, Pinar del Río, Cuba.

²AFPI, Dpto. Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana-A,
Av. San Pablo 180, Atzacotalco, Cd. de México, México

¹gjaimem@upr.edu.cu, ²dll@azc.uam.mx, ³daysi@upr.edu.cu

1. Resumen

El proceso de enseñanza-aprendizaje es una actividad fundamental en el desarrollo de cualquier sociedad. Contiene básicamente tres elementos que lo definen: formación, educación y capacitación. El grado de responsabilidad entre el alumno y el profesor varía de acuerdo con el nivel escolar. En el nivel superior el reto es lograr la adecuada comprensión de los conocimientos que transmite el profesor, tomando en cuenta las diversas formas de respuesta a ese objetivo por el alumno, así como sus intereses. En el presente manuscrito consideramos diversos elementos que podrían ayudar a lograr este reto al considerar el aspecto histórico-filosófico del surgimiento de las leyes en las ciencias. Proponemos una discusión sobre diversas ideas al respecto y mostramos una forma de empezar a desarrollar cualquier tema de las ciencias, enfatizando el de las diversas disciplinas de la física que permita una comprensión adecuada del por qué y para qué estudiar ciencias.

2. Introducción

Mucho se ha escrito sobre los problemas que conlleva el proceso de enseñanza-aprendizaje, y mucho se ha escrito sobre la manera de abordarlo, incluyendo “novedosas” metodologías que finalmente resultan experimentos forzados, cuyos resultados se interpretan sesgadamente como un buen resultado del uso de esas metodologías. En la actualidad muchos profesores y pedagogos ven en las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) una panacea, pero finalmente caen en lo mismo que se quiere superar. De la misma manera se observa el no adecuado uso de los mapas conceptuales, como lo evidencia Ariza y col.^[1], quienes mencionan un estudio hecho para evaluar la eficacia del uso de los mapas conceptuales, y cuyos resultados muestran una nula

aportación de esta herramienta, lo cual no quiere decir que no sea inútil, sino más bien que han sido usados de manera no adecuada, con objetivos no convenientes.

Además, desafortunadamente un gran número de profesores y pedagogos pasan por alto la actitud del alumno sobre el aprendizaje. La experiencia de muchos años enfrentando este problema, analizando cómo se comporta el alumno promedio en una clase, nos muestra que si el alumno no quiere, o no está interesado, o no le gusta lo que estamos queriendo hacerle entender, no obtendremos un buen resultado de él. Podemos hacer cualquier malabar en el salón de clase, pero no lograremos gran cosa a menos que despertemos el deseo de aprender del estudiante. En estudios previos sobre este problema, se comenta que el alumno que llega al nivel superior de enseñanza llega con una carga enorme de aprendizaje por “memorización”; lo cual no es del todo malo, si consideramos que hay partes del conocimiento que deben aprenderse de esa forma, como por ejemplo la redacción y la ortografía o las operaciones en las distintas ramas de la matemática, que es diferente a la comprensión de conceptos y teorías sobre los fundamentos, desarrollo y aplicación de estos. Pero, la experiencia indica que en el caso de las ciencias que llamamos “naturales” sobre todo, el aprendizaje por “memorización” es la peor forma de llevar el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Las ciencias son fundamentalmente filosofía. Se basan en una observación sistemática de cómo funciona la naturaleza, y la sistematización de las conclusiones que se pueden extraer de dicha observación, además de la experimentación bajo ciertas condiciones necesarias. Una experiencia al respecto, relatada por R. Feynmann, después de haber impartido cursos en Brasil es muy aleccionadora: relata la manera como los alumnos aprendían, respondían a las preguntas sobre los conceptos, pero no lograban relacionar tales conceptos y formulaciones teóricas con aspectos de la vida cotidiana^[2].

En el presente manuscrito nos centraremos en la discusión sobre la viabilidad de introducir los conceptos de las ciencias a partir de la historia, haciendo hincapié en el aspecto filosófico de estos conceptos. El objetivo es mostrar la posibilidad de despertar en el alumno el interés, aunque sea marginal, de profundizar en el aprendizaje de las ciencias. Partimos de la idea de R. Feynmann, de que pensando en los alumnos “*el propósito de la enseñanza es inspirarles el deseo de aprender y hacerlos capaces de pensar, comprender y cuestionar*”. Esto indica que es necesario abandonar el esquema de solo la memorización de “fórmulas” y procedimientos, y en su lugar buscar que el alumno empiece por aprender a desarrollar una metodología a partir de la adecuada utilización y comprensión de los conceptos básicos de cualquier tema en las ciencias, considerando la comprensión de estos conceptos y leyes como una metodología adecuada para el desarrollo sustentable de las diferentes herramientas que ha creado la humanidad. Es decir, el principal objetivo es la comprensión de cómo funciona la naturaleza, para que al aplicar ese conocimiento se consideren las consecuencias del desarrollo tecnológico, y los riesgos para las condiciones de vida planetaria y del medio ambiente, lo que lleva a considerar acciones para aminorar el llamado cambio climático. Utilizamos mapas conceptuales para mostrar relaciones de conceptos o establecer esquemas de desarrollo de las ciencias, considerando que un mapa conceptual es como un resumen de lo que se ha aprendido, ordenado en forma jerárquica, en un esquema que muestra lo que se ha entendido^[3,4]; esto es no genera conocimiento sino que se genera una vez que se ha entendido y aprendido algo; a pesar de que diversos autores pretenden presentarlos como útiles para el aprendizaje de las ciencias^[5-7].

3. Metodología

Es común que en el inicio del estudio de cualquier tema de ciencias el profesor introduzca los conceptos básicos, y realice una exposición de cómo resolver problemas propuestos, llegando a un esquema de resolución ya sin atender a esos principios básicos. La evaluación a veces se centra en las respuestas, correctas o no, sin evaluar si el alumno utilizó adecuadamente los conceptos, y realizó un desarrollo lógico de la resolución. Es decir se está ante el esquema datos-fórmula-substitución-resultado. Poco interesa en ese momento cómo, por qué y para qué se desarrolló tal metodología. Propondremos algunas ideas sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje, desde un punto de vista histórico, señalando la importancia del experimento en la generación de una teoría.

3.1 Las ciencias, ¿qué son?

Desde un punto de vista epistemológico encontramos que las ciencias son parte de la filosofía, en su acepción más común como el conjunto de reflexiones sobre la esencia, las propiedades, las causas y los efectos de las cosas naturales, de manera que podemos establecer un “árbol genealógico de las ciencias”, Figura 1, tomando como punto de partida las reflexiones sobre ella de M. Bunge^[8]. Visto de esta manera, el estudio de las ciencias resulta una actividad derivada de la necesidad de entender, apreciar y buscar aprovechar los hechos naturales. Obsérvese que evitamos llamarles “fenómenos naturales”. La razón es simple, un fenómeno es algo extraordinario, no usual, no esperado; en cambio la naturaleza está llena de hechos que ella misma provoca, hechos naturales. Por ejemplo en el caso de la termodinámica un proceso espontáneo es un proceso que no precisa de la realización de trabajo, lo que significa que espontáneo es sinónimo de natural^[9]. Entonces, para explicar un hecho natural, en vez de recurrir inmediatamente a la definición y establecer un modelo matemático, conviene primero explicar el origen del estudio de tal hecho, sus primeras interpretaciones, y sus posteriores reinterpretaciones a la luz de nuevas o más exhaustivas observaciones.

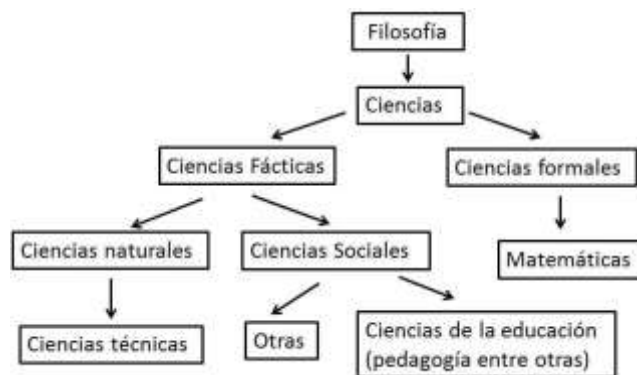


Figura 1. Filosofía y ciencias, modelo de clasificación general

Las leyes que se han encontrado de la manera como actúa la naturaleza en cada hecho tiene una historia con un origen, un desarrollo y un constante cambio en la forma de expresarlo. Esto muestra que las ciencias, particularmente las llamadas ciencias

naturales, son profundamente dialécticas al momento de considerar la interpretación y expresión de cualquier hecho. Indica además la validez de una forma de estudio de ellas, conocido como método científico, que esquemáticamente muestra cómo se han desarrollado los conceptos y leyes. De manera muy simplificada podemos mostrar en cada inicio de un tema por estudiar, la manera cómo se ha llegado a establecer una Ley, valiéndonos de un diagrama como el que se muestra en la Figura 2^[10], considerando los detalles históricos expresados en cada etapa de su desarrollo.

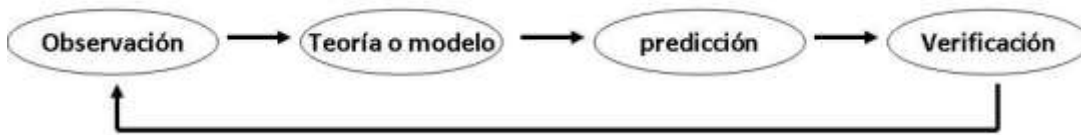


Figura 2. Diagrama que muestra los pasos principales del Método Científico

Una exposición en ese sentido de cualquier hecho natural o ley de la naturaleza, desde su origen hasta su forma actual, podría ayudar mejor al alumno a comprender y entender la razón, la necesidad y la importancia de dicho estudio. Desde luego con la explicación pertinente de los hechos naturales, por ejemplo mostrando como se puede estudiar el movimiento sobre un plano inclinado, o la transferencia de calor entre dos cuerpos a diferente temperatura.

3.2 La evolución de una teoría

Toda teoría, y toda Ley científica tienen una historia. El método científico nos muestra, de manera sencilla como se llega a establecer una ley científica, y como esta ley va modificándose. Básicamente una teoría científica es una explicación de un aspecto del mundo natural o social que necesariamente debe ser corroborada repetidamente por medio de una medición y evaluación de resultados. Generalmente las teorías se prueban en condiciones controladas, cuando es posible realizar un experimento. Cuando no es posible realizar una prueba experimental, las teorías se evalúan mediante principios de razonamiento abductivo, que es la manera como la descripción de un hecho ofrece la oportunidad de una hipótesis que explique las posibles razones del hecho, considerando las premisas obtenidas.

Las teorías sobre algún hecho natural deben resistir un escrutinio riguroso para ser consideradas como parte del conocimiento científico. Una teoría explica el por qué y el cómo de un hecho natural, considerando observaciones sobre ello. En tanto que una Ley es una declaración sobre una relación entre hechos u otras leyes, que ha sido probada. Desafortunadamente pocas veces se da una explicación sobre estos aspectos, de manera que se llega a confundir unos con otros y, según se observa, es una de las causas del no entender de muchos estudiantes.

Es importante señalar que las teorías parten de hipótesis (supuestos plausibles) que han sido corroboradas, que luego de recolectar pruebas que muestren la validez de dichas teorías, que se han obtenido siguiendo el método científico, se puede considerar que representan una ley de la naturaleza. La finalidad de una teoría es explicar y predecir un hecho o la consecuencia de un hecho. Puede mostrarse esquemáticamente la manera como una suposición se puede convertir en una teoría, Figura 3, considerando que debe

describir con precisión las observaciones de un hecho natural, a partir de un modelo que represente el hecho.

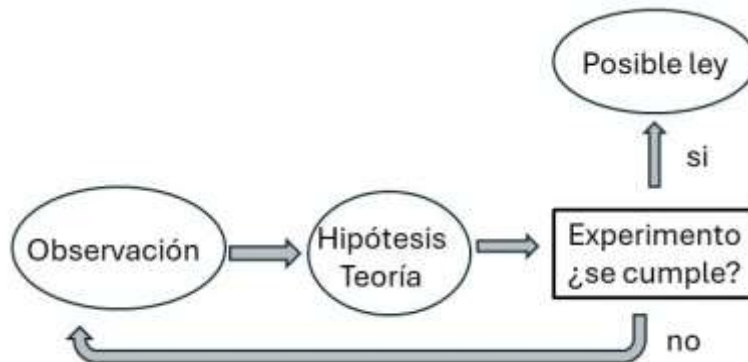


Figura 3. De la observación a la Ley

La fuerza de una teoría científica se relaciona con la cantidad de hechos naturales que puede explicar, con la finalidad de hacer predicciones falsables respecto de dichos hechos naturales. Entonces, las teorías son el fundamento para obtener conocimiento científico, pero también para producir avances técnicos, y es la forma más rigurosa, confiable y completa de conocimiento posible. Además debe predecir los resultados de futuras observaciones. Pero hacemos notar que una teoría es siempre provisional, en el sentido que es solo una hipótesis, y se puede refutar si existe al menos una observación que esté en desacuerdo con las predicciones de ella. En cambio, cuando se afirma algo sin sustento no se tiene una teoría sino una suposición.

3.3 Estudiar ciencia, para qué

Aunque según su etimología la palabra “ciencia” significa lo mismo que la palabra “conocimiento”, actualmente se utiliza la palabra ciencia para referirse sólo al conocimiento sistematizado, validado y aceptado por la comunidad científica, independientemente de los criterios de validación y aceptabilidad del conocimiento científico. El conocimiento científico es una construcción humana que tiene por objetivo comprender, explicar y también actuar sobre la naturaleza. No puede ser dado como absoluto y está sujeto a reconstrucciones. El conocimiento científico está constituido por conceptos, juicios y raciocinios, en el que las ideas son punto de partida y punto final del trabajo científico, aunque la percepción y la representación mental forman parte de las operaciones que el científico realiza para construir esas ideas. Se exige, además, que esas ideas puedan combinarse de manera lógica y se estructuren en conjuntos ordenados de proposiciones, las teorías^[8]. La coexistencia de teorías rivales es la regla en el desarrollo de la ciencia, de modo que la adopción de teorías, y por extensión de modelos, es primordialmente una actividad comparativa^[11-13]. Desde esta perspectiva, deben establecerse criterios de comparación y selección

El método científico es básicamente una combinación de razonamiento lógico y observación cuidadosa. Mediante su aplicación y con un severo código de honestidad profesional es de esperarse que la ciencia produzca una acumulación de conocimiento objetivo acerca del mundo, pues la integridad intelectual y profesional en la práctica es sostenida por el sistema de arbitraje por pares (trabajo científico evaluado por científicos).

Significa una correcta aplicación del método de trabajo y buen funcionamiento del código de conducta, de esta manera se garantiza el consenso y la honestidad en la ciencia; previniendo controversia y evitando fraude.

Pero, lo más importante es que el uso del método científico, aunque no se realice de manera consciente, permite crear conocimiento que lleva a encontrar soluciones a los desafíos económicos y sociales que enfrentan las sociedades. Pero también ha generado problemas que se deben enfrentar. Indudablemente ha permitido avances en cuanto a una mejor calidad de vida. Pero la concepción de las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad se presenta triunfalista. Se encuentra presente en diversos ámbitos del mundo académico y en los medios de divulgación, y se resume en la idea de un modelo lineal de desarrollo, que no siempre se manifiesta de esa manera, debido a que en muchas de las sociedades actuales no se ha obtenido el bienestar esperado para la mayoría de los ciudadanos. Esto es, se concibe la idea de:

CIENCIA + TECNOLOGÍA → MAYOR BIENESTAR SOCIAL

Pero, el gran problema aparece cuando se aplican esos conocimientos a la vida cotidiana, o al desarrollo de nuevas tecnologías que pueden ser adecuadas para el mejoramiento de la vida humana, pero también pueden ser nefastas para el estado en que queda el medio ambiente como consecuencia de buscar mejorar el bienestar de los humanos. Childe^[14] explica esa apropiación de la especie humana de todo lo que lo rodea, que en pocas palabras se puede expresar como: *convencidos de que somos una especie única, se han elaborado formas de mostrar que el mundo es propiedad de esta especie, porque un “ser supremo” nos ha puesto como su gran logro (hecho a su imagen y semejanza), o en el caso de que no sea ese “ser supremo”, simplemente los humanos nos hemos apropiado de la facultad de alterar ciertos procesos naturales, para aprovecharlos en nuestro beneficio, sin importar a quién hacemos daño.*

Entonces, el mismo camino que ha seguido la humanidad para apropiarse de los secretos de la naturaleza puede permitirnos encontrar la manera de enfrentar las consecuencias de esta apropiación. Visto de esta manera, y conversado con los alumnos, podríamos obtener profesionales comprometidos con el desarrollo tecnológico, pero al mismo tiempo con la conciencia de cuidar la naturaleza, a la que le hemos robado sus secretos.

3.4 Los dilemas de la ciencia: la importancia de cuidar el medio ambiente

La conciencia de que los avances tecnológicos han creado problemas, en el entorno de la vida humana, se ha observado desde hace tiempo. Pero solo hasta muy recientemente se han realizado estudios muy serios encaminados a crear alertas del peligro, y se han establecido protocolos con un consenso global, que se considera deben abordarse al momento de enseñar ciencia. De entre los primeros estudios con dicha orientación se encuentran los realizados sobre el daño a la capa de ozono, que funciona como escudo protector para la vida en el planeta^[15,16]. Particularmente, para una de las ciudades más contaminadas se han hecho estudios orientados a mostrar la importancia del control de ciertos desechos que contaminan la atmósfera^[17-19], entre otros.

La mayor parte de los problemas ambientales actuales están determinados por la acción del hombre, e influyen en la manera como los hechos naturales cambian. Consecuentemente, en la actualidad las investigaciones de la ciencia y la tecnología se orientan de manera que se puedan minimizar los efectos adversos al entorno, como única forma de salvar al planeta y tener un futuro sostenible. Por tanto, se hace imprescindible que las instituciones de enseñanza incluyan en los contenidos temáticos reflexiones, orientaciones y propuestas dirigidas hacia la búsqueda de una mayor conciencia social, incluyendo los problemas ambientales dentro de las asignaturas; debe promoverse un pensamiento crítico, reflexivo, en el alumnado, incluyendo la valoración de alternativas para elevar la calidad de la vida humana, minimizando el impacto al medio ambiente.

Un enfoque de la enseñanza de las ciencias, que al mismo tiempo muestre la manera como se obtiene el conocimiento, y contemple una discusión sobre los efectos adversos del desarrollo, basado en ese conocimiento, resulta fundamental para que los futuros profesionales realicen su tarea con una adecuada conciencia social. En ese sentido diversos autores han expuesto sus puntos de vista, en cuanto a la manera de inducir una conciencia social en los alumnos de nivel superior, fundamentalmente, pero sin descuidar esos elementos en los primeros años de enseñanza (en los niveles previos a la Universidad)^[20-26].

4. Resultados y discusión

De las consideraciones previas se desprende la necesidad de mostrar un planteamiento de lo que podría ser un modelo de enseñanza de las ciencias, que permitan al alumno tener una idea clara de cómo se ha generado el conocimiento, qué se entiende por conocimiento y cuáles son los posibles beneficios de dicho conocimiento, así como su posible impacto en el medio ambiente.

Para la primera parte, el cómo, se considera mostrar una historia de los conceptos y evolución de estos conceptos. Siguiendo la línea de exposición, se contempla una explicación de estos conceptos (incluidas sus representaciones matemáticas), para adquirir la destreza necesaria de su aplicación, y finalmente establecer de manera sencilla sus aplicaciones y sus efectos en el medio ambiente. Una representación esquemática de esta idea se considera como muestra la Figura 4. Pero debe tomarse en cuenta que una cosa es mostrar esquemáticamente cómo ha evolucionado un concepto, con su posible formulación matemática, y otra el estudio mismo de él. Así como una cosa es estudiar sus aplicaciones, y otra la necesidad de considerar el efecto de esas aplicaciones.

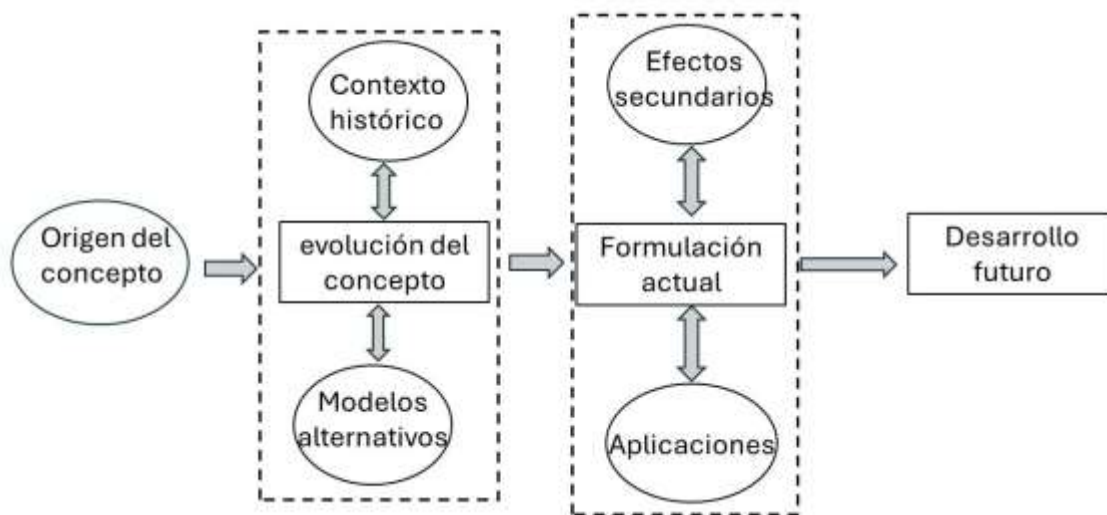


Figura 4. Esquema del desarrollo de un tema, considerando los aspectos discutidos

Resulta evidente que este modelo de desarrollo de un tema se considera para la duración de un curso, durante el tiempo necesario de exposición del tema en cuestión. No debe entenderse como el desarrollo de una sesión en el aula, sino más bien como el desarrollo durante varias sesiones. Esto es, considerando tal vez cada aspecto para una sola sesión, o las que hagan falta.

Es también evidente que el esquema mostrado en la Figura 4 es solo uno de tantos que se puedan generar. Cada docente podría considerar otras formas de hacerlo, incluyendo los aspectos mostrados, o bien otros no considerados en este ejemplo. Se espera que la discusión del desarrollo histórico de un concepto permita al alumno comprender que cada desarrollo tecnológico, o concepto sobre un hecho natural, surge de la necesidad de establecer un conocimiento organizado, de manera que sea útil. El estudio, o al menos la discusión, de las posibles consecuencias adversas resulta también fundamental para crear la conciencia del llamado desarrollo sustentable.

5. Conclusiones

De la exposición sobre la ciencia, y los múltiples problemas que se enfrentan al enseñar ciencia, básicamente en el nivel universitario, se puede concluir que existe la necesidad de desarrollar propuestas de cómo dar solución a dichos problemas, de manera abierta (creando foros de discusión) a las múltiples ideas que los propios actores del proceso de enseñanza-aprendizaje contemplan. Si bien, los principales actores son los alumnos, debemos considerar el hecho de que sus opiniones serán válidas únicamente cuando se pueda probar que comprenden el problema; esto es, cuando ya sean egresados, con una calificación laboral y, preferentemente si han incursionado en la docencia. Esto es, uno no puede opinar sobre algo si no conoce los matices y la esencia de ese algo.

6. Referencias

1. Ariza D. L., Yaber I. A., Muñiz J. L., Hurtado J. S., Figueroa R. E., Salud Uninorte, V. 25 (2), 220-231 (2009).

2. Feynman R. P., *ContactoS*, V. 4 (4), 56-60 (1989).
3. Giraldo I. C., Los mapas conceptuales, *EDUCA UMCH*, 9, 35-64 (2017)
4. Cárcel F. J., Aplicación del uso de mapas conceptuales para relacionar conceptos, *3C Empresa*, V. 5 (2), 73-82 (2016)
5. Concarí, S. B., Las teorías y modelos en la explicación científica: implicancias para la enseñanza, *Ciencia & Educación*, V. 7 (1), 85-94 (2001).
6. Valdés M. A., Menéndez, L. M., Valdés-Pardo, M. G., Los mapas conceptuales: un recurso para el aprendizaje apoyado en tecnologías, *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación*, V. 28, 89-97 (2006).
7. Montes, B., Pérez, L.G., Los mapas conceptuales como recurso docente, *Ini. Inv*, e3: a9, I-X (2008) file:///D:/Users/DL/Downloads/Mapasconceptuales-e3a9-1.pdf
8. Bunge, M., "La ciencia su método y su filosofía", Editorial Siglo XX, 1980.
9. (Atkins P., "Las cuatro leyes del universo", Editorial Espasa Calpe, 2008.
10. Jaime-Mirabal G., Ladino-Luna D., 13^{vo} CAIP, 976-981 (2017)
11. Treagust, D., Chittleborough, G., Mamiela T. L., Students' understanding of the role of scientific models in learning science, *International Journal of Science Education*, V. 24 (4), 357-368 (2010).
12. Rivadulla, A., Metáforas y modelos en ciencia y filosofía, *Revista de Filosofía*, V. 31 (2), 189-202 (2006).
13. Perkins-Gough, D., Understanding the scientific enterprise: a conversation with Alan Leshner, *Educational Leadership*, V. 64 (4), 8-15 (2007).
14. Childe, V.G., "Man makes itself", Pitman Pub., 1936.
15. Molina M.J., Rowland, F.S., Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atomcatalysed destruction of ozone, *Nature*, V. 249, 810-812, (1974).
16. Molina, M.J., Zaelke, D., Sarma, K.M., Andersen, S.O., Ramanathan, V., Kaniaru, D., Reducing abrupt climate change risk using the Montreal protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions, *PNAS*, V. 106 (49), 20616-20621 (2009).
17. Jhonson, K.S., de Foy, B., Zubert, B., Molina, L.T., Molina M.J., Xie, Y., Laskin, A., Shutthnandan, V., Aerosol composition and source apportionment in the Mexico city metropolitan area with PIXE/PESA/STIM and multivariate análisis, *Atmos. Chem. Phys.* V. 6, 4591-4600 (2006).
18. Volkamer, R., Sheehy, P., Molina, L.T., Molina, M.J., Oxidative capacity of the Mexico city atmosphere-Part 1: A radical source perspective, *Atmos. Chem. Phys.* V. 10, 6969-6991 (2010).
19. Sheehy, P., Volkamer, R., Molina, L.T., Molina, M.J., Oxidative capacity of the Mexico city atmosphere-Part 2: A RO_x cycling perspective, *Atmos. Chem. Phys.* V. 10, 6993-7008 (2010).
20. Díaz-Cordero, G., El cambio climático, *Ciencia y Sociedad*, V. XXXVII (2), 227-240, (1012).
21. Santos I., Laportilla N. D., Castro L., El perfeccionamiento de la educación ambiental para el desarrollo sostenible en el sistema nacional de educación de Cuba, *Medio Ambiente y Desarrollo* V. 20 (38), 1-11 (2020).
22. Kaddo, J., Climate change: causes, effects, and solutions. A with Honors projects. 1-13 (2016).
23. Fernández, C., Martínez, A., Bosque, R., El perfeccionamiento de la educación ambiental para el desarrollo sostenible en la educación primaria. Ideas rectoras y consideraciones generales. *Ciencias de la educación, VARONA* V. 67, 1-8 (2018) <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=360671782020>.
24. Gutiérrez, J., Meira, P., González E., Educación y comunicación para el cambio climático. *Revista mexicana de investigación educativa*. V. 25 (87), 819-842 (2021).V.
25. Prentice, C.M., Vergunst, F., Minor, K., Education outcomes in the era of global climate change, *nature climate change* V. 14, 214-224 (2024).
26. Nusche, D., Fuster, M., Lauterbach, S., "Rethinking education in the contex of climate change: Leverage points for transformative change". Chapter 2, Getting the foundations right:

Rediseño de modelo virtual de una caldera para uso en ambientes inmersivos

Aburto, L. R.¹, Bautista, B.L.Y.¹, Gutiérrez, L.M.R.², Cornelio, S.E.¹

¹ Departamento de Ingeniería Mecatrónica, DIMEI, Facultad de Ingeniería.

² Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química.

^{1,2} Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, C.P. 04510, México

rodrigo10aburto@gmail.com

yair.bautista@ingenieria.unam.edu

rafaelag@unam.mx

erickcsbatman@gmail.com

1. Resumen

Este artículo presenta el rediseño de un recurso educativo virtual con el potencial de uso en entornos inmersivos que para que usuarios interesados en la constitución y operación de una caldera pueda ingresar a la representación virtual de un laboratorio y visualizar las partes que componen una, generando así un primer acercamiento a la misma. El recurso busca permitir a los usuarios acceder al contenido de estudio de manera atemporal, eliminando la limitación de requerir acompañamiento por personal capacitado para operar la caldera real o la dificultad de visitarla físicamente. Se exploran los pros y contras entre las técnicas de modelado por fotogrametría y *CAD Low Poly* con la finalidad de obtener la máxima fidelidad visual y detalles para lograr una experiencia realista, sin comprometer el rendimiento gráfico o recursos computacionales requeridos para su despliegue en la plataforma seleccionada.

1. Abstract

This article presents the redesign of a virtual educational resource with potential use in immersive environments. This resource aims to allow users interested in the constitution and operation of a boiler to enter a virtual representation of a laboratory and visualize its components, thus facilitating an initial understanding of it. The resource seeks to enable

users to access study content at any time, eliminating the need for supervision by trained personnel to operate the real boiler or the difficulty of physically visiting it. The pros and cons of photogrammetry and Low Poly CAD modeling techniques are explored to achieve maximum visual fidelity and detail, aiming for a realistic experience without compromising graphical performance or the computational resources required for deployment on the selected platform.

2. Introducción

El objetivo de este trabajo es reportar las mejoras realizadas al rediseñar un modelo 3D basado en un objeto real de estudio, en este caso una caldera ubicada en el laboratorio de Ingeniería Química en la UNAM, donde los estudiantes suelen estudiar algunos temas referentes a su operación y uso relacionado a la termodinámica. Inicialmente se utilizó la técnica de fotogrametría al ser ampliamente utilizada para virtualizar modelos complejos, sin embargo, al transferir y depurar el modelo, se observó una pérdida significativa de detalles y una calidad no deseable, debido a la presencia de muchos huecos entre mallas por lo que se decidió explorar otro método de modelado más clásico cuidando los detalles y basándose en fotografías del entorno real originalmente tomadas para el primer modelado. Gracias al uso de la técnica *Low Poly* se logró optimizar el rendimiento gráfico del modelo, al integrar la menor cantidad de polígonos posible para evitar que el modelo tuviera un peso de archivo adecuado para su aplicación. ^[1]

Habiendo obtenido un modelo con alta similitud a la contraparte real que lo inspiró, se implementaron los colores correspondientes para cada botón, panel, tubería y la caldera misma, siguiendo un código de colores para garantizar una correcta identificación y comprensión; también se añadieron texturas adecuadas para que los materiales correspondieran con los reales. Al final se integró el modelo en un ambiente virtual que representara el espacio en el que se encuentra realmente en el laboratorio para corroborar que su despliegue en entornos inmersivos fuera posible, y se identificaron las mejoras obtenidas en parámetros gráficos.

3. Marco Teórico

3.1 Técnica de fotogrametría para generar modelos 3D.

La fotogrametría es la técnica de crear modelos tridimensionales de alta definición a partir de imágenes digitales, utilizando el principio de la estructura a partir de movimiento (SfM), esto implica capturar la relación espacial y geométrica de un objeto mediante el movimiento de una cámara fotográfica, generando información para construir una representación digital en tres dimensiones. Este proceso suele emplearse para evitar

modelar pieza por pieza un objeto con gran número de elementos que lo constituyan ya que el resultado final suele ser una única malla envolvente en la que las fotografías se usan como textura y generan una visualización integral de los modelos. Avances en calidad fotográfica, desarrollo de procesadores de cómputo y algoritmos eficientes han impulsado el desarrollo de técnicas como la fotogrametría. ^[2]

3.2 Técnica *Low Poly* para generar modelos 3D.

El estilo *Low Poly* en el mundo 3D ofrece varias ventajas significativas. Utilizando menos polígonos, se reduce el poder de procesamiento necesario para renderizar modelos 3D, lo que acelera la creación y procesamiento de proyectos de animación y diseño. Además, sus formas geométricas simples y colores planos proporcionan una estética única y visualmente atractiva. Los modelos *Low Poly* son altamente compatibles con diversas plataformas y dispositivos, incluyendo multimedia y aplicaciones móviles, sin comprometer el rendimiento de la aplicación. También son fáciles de integrar con otras técnicas de animación y diseño, como la realidad virtual, realidad aumentada, gracias a su peso ligero y facilidad de manipulación en comparación con los modelos 3D de alta definición. ^{[3] [4]}

3.3 Antecedentes

El equipo de trabajo había desarrollado con anterioridad un modelo utilizando fotogrametría con un equipo que cuenta con LiDAR, para el cual se describen a continuación los pasos utilizados:

- Toma de fotografías: Se capturan múltiples fotografías de la caldera desde diferentes ángulos para utilizarlas en el proceso de fotogrametría.
- Fotogrametría con Meshroom: Se utilizan las imágenes capturadas con el software Meshroom, y se inicia el procesamiento observando el avance en la interfaz corroborando que la malla en construcción y la textura fueran coincidentes con la apariencia del modelo real.
- Limpieza de modelos en Blender: Se importa el modelo 3D generado y se procede a limpiarlo, es decir eliminar las partes no deseadas con la supresión de caras. Se ajustan las texturas y se optimiza el modelo reduciendo el número de triángulos con el modificador de decimado.
- Uso de LiDAR: Debido a secciones incompletas del modelo, se empleó la función de LiDAR de una cámara para obtener información complementaria de secciones específicas en la caldera. Esta nueva información se importa, limpia, y se integra al modelo previamente obtenido en Blender para obtener una versión de prueba a exportar para su uso en un entorno virtual.
- Creación del espacio inmersivo: el modelo de la caldera fue importado a un motor gráfico (Unity) y se le desarrolló un ambiente complementario para asemejar al

espacio físico en el que debe encontrarse la caldera (figura 1); se le programaron funciones para que los usuarios puedan desplazarse espacialmente en el ambiente, y se exportó a una plataforma inmersiva gratuita de amplio uso conocida como VRChat en la que se puede ingresar con un equipo de cómputo, un dispositivo móvil, o visores de VR.



Figura 1. Modelo de la caldera con la técnica de fotogrametría, a la izquierda en el modelador (Blender), y a la derecha en el motor gráfico ya montado el objeto en un ambiente que incluye piso, paredes, y marcas de seguridad.

Como resultado de este primer proceso, se obtuvo un modelo con las métricas que se muestran en la figura 2, el tamaño del ambiente compilado para VRChat ocupa prácticamente el 50% disponible ya que el límite es de 100 MB para que sea compatible con versiones móviles de la plataforma, por otra parte, en la siguiente sección se hablará de la importancia de poder tener la menor cantidad de triángulos posibles en un modelo para mejorar su ejecución en aplicaciones de cómputo gráfico.

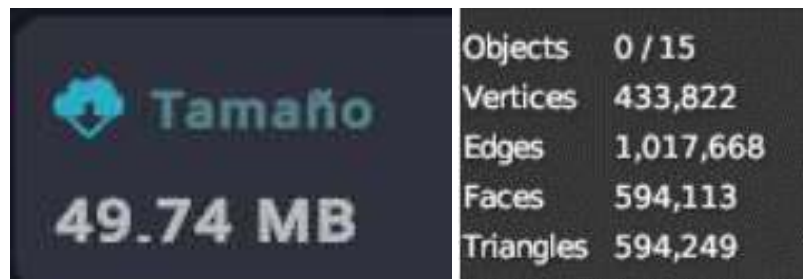


Figura 2. A la izquierda imagen con el peso del ambiente en VRChat, a la derecha estadísticas en Blender del modelo creado con fotogrametría.

3.4 Triángulos y la demanda computacional

Los triángulos, en el contexto de la computación gráfica, se relacionan directamente con la demanda de recursos por la complejidad del cálculo requerido para procesar datos geométricos. Los motores gráficos utilizan predominantemente triángulos en sus sistemas debido a varias razones: su simplicidad, ya que son los polígonos más simples formados por tres puntos; su planaridad, que garantiza que siempre se encuentren en un solo plano sin distorsiones; su eficiencia, dado que las GPU modernas están optimizadas para procesarlos rápidamente; y su flexibilidad, ya que cualquier otro polígono puede dividirse en triángulos, lo que los hace versátiles para construir formas 3D complejas. ^[5]

Dependiendo del equipo que use será el rendimiento que obtenido al correr un renderizado complejo, por eso un modelo con muchos triángulos aumenta la complejidad de las operaciones computacionales por la cantidad de cálculos geométricos y de procesamiento de datos a realizar. Esto impacta directamente en la demanda de esfuerzo computacional, que se refleja en la necesidad de recursos como la potencia de CPU, la capacidad de la GPU y la memoria para manejar eficientemente estos datos geométricos complejos. ^[6]

Considerando entonces que la cantidad de triángulos obtenida en el modelo de fotogrametría es muy alta, y por lo tanto requeriría características muy específicas en los equipos en los que fuese a ser desplegado, se busca elaborar un rediseño que permita obtener una mejora en la cantidad de triángulos requeridos para representar el mismo objeto y con una apariencia gráfica lo más similar al modelo real.

4. Rediseño del modelo de caldera con la técnica *Low Poly*

4.1 Utilización de fotografías como referencia

Durante el proceso de fotogrametría, se tomaron múltiples imágenes desde diversos ángulos como los que se muestran en la figura 3, lo cual fue de utilidad como guía para identificar las geometrías primitivas que originan cada uno de los componentes, por ejemplo, prismas rectangulares para paneles y gabinetes, así como cilindros para tuberías, botones, y la misma caldera. Esto también permitió parametrizar las dimensiones de los objetos sin necesidad de tomar medidas directamente en el sitio, y relacionarlas con las dimensiones de los planos de la caldera disponibles en la documentación de la que se disponía.



Figura 3. Fotografías de la caldera en el laboratorio de Ingeniería Química.

4.2 Construcción del cuerpo principal y accesorios

Se comenzó formando el cuerpo principal de la caldera, para luego modelar y añadir progresivamente cada accesorio que la compone, para esto, se partió de un modelo primitivo inicial y se emplearon modificadores (principalmente extrusiones) para esculpir y dar forma a cada componente de la caldera de manera individual, guardando la información en archivos separados para realizar las modificaciones a los archivos originales sin alterar su integración una vez que fueran un solo cuerpo con la caldera, conservando así las mallas y triángulos originales que los conforman. Cada modelo y pieza se incorporó a la estructura principal de acuerdo con sus dimensiones y ubicación específica en la caldera acorde a los planos originales de la marca y modelo. El resultado de esta parte del proceso se puede visualizar en la figura 4.

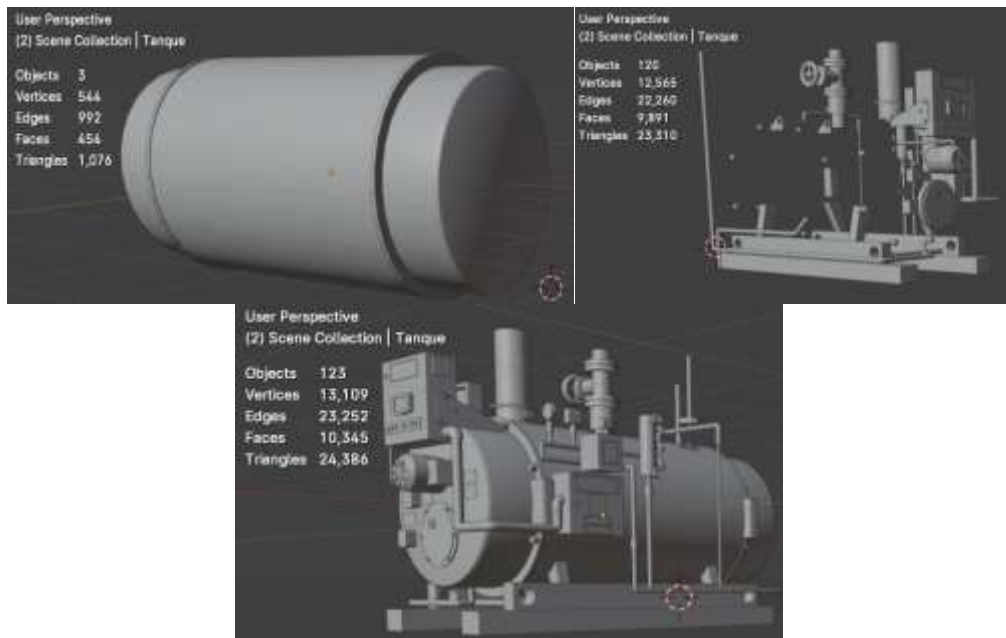


Figura 4. En la parte superior izquierda se observa el cuerpo principal de la caldera, a la derecha la serie de componentes (páneles, motores, tuberías), y en la parte inferior la integración de todas las partes. Se deja la información de los triángulos que los componen.

Una vez que los modelos geométricos estuvieron elaborados, se procedió a añadir los colores acordes a la paleta descrita por las fotos del objeto real, y se añadieron texturas para definir la apariencia metálica o plástica de cada componente según correspondiera. Este aspecto permitiría hacer una correlación visual directa entre el recurso virtual y su contraparte física, se observa el resultado en la figura 5.

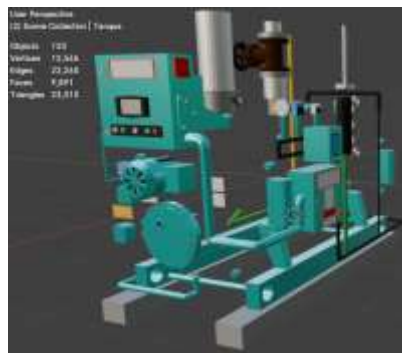


Figura 5. Colores y texturas aplicadas al grupo de accesorios que conforman la caldera virtual.

4.3 Exportación del modelo al ambiente virtual

En el software de modelado se exportó el archivo con extensión fbx para hacerlo directamente compatible con el motor gráfico. Para que las sombras ajustaran al entorno como si estuviera llegando luz natural desde las ventanas del laboratorio, se ajustó la iluminación, y se agregaron planos colisionables para simular las paredes, piso, y techo que conformaron el laboratorio virtual. Se complementó el ambiente con otros planos con texturas para representar la cinta de precaución que delimita el área de trabajo, así como las rendijas de desagüe, favoreciendo así la similitud entre el espacio real y el virtual. En figura 6 se puede visualizar una comparativa entre el ambiente creado con la caldera por fotogrametría, y la de *Low Poly*.



Figura 6. A la izquierda el modelo de fotogrametría, a la derecha el modelo por Low Poly.

Los modelos correspondientes a las tuberías externas a la caldera se agregaron directamente con los componentes del motor gráfico para favorecer que ya estuvieran optimizados gráficamente y evitaran agregar una cantidad considerable de triángulos al modelo, objetivo que se busca cuidar para realmente obtener una mejora respecto al recurso que ya se tenía en fotogrametría. En la figura 7 se observa cómo se visualizaron las tuberías en el motor gráfico post escalamiento para coincidir con los planos originales de la caldera.

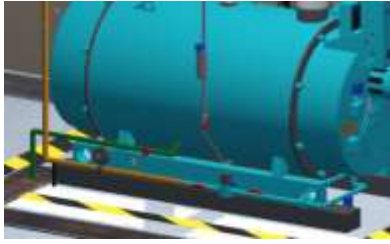


Figura 7. Complemento de tuberías montado directamente sobre el motor gráfico.

4.4 Pruebas de operación en ambiente inmersivo

Utilizando el SDK de la plataforma inmersiva, se exportó el ambiente virtual completo hacia VRChat, tanto en la versión de Windows, como en la versión de Android para así poder realizar pruebas en los tres tipos de potenciales dispositivos para su aprovechamiento: computadoras personales, teléfonos inteligentes, y visores de realidad virtual. Se realizaron pruebas de operación en los tres sistemas con gafas de realidad virtual (figura 8), se corroboró que el desplazamiento en el ambiente permitiera navegar por las mismas áreas que se podrían visitar en el laboratorio real y que la visualización de la caldera y sus componentes también asemejara a la de su contraparte. Conforme a lo esperado por la técnica empleada, se confirmó que el rendimiento era óptimo ya que no se experimentó pérdida de cuadros ni retrasos en la transmisión del renderizado en tiempo real.

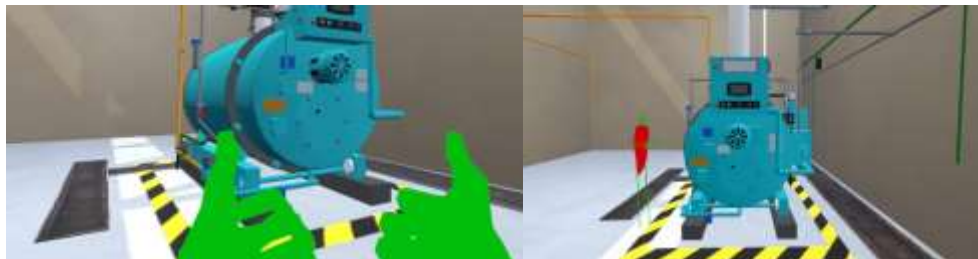


Figura 8. A la izquierda, visualización del entorno en VRChat en primera persona, a la derecha vista tercera persona donde aprecia un avatar al lado de la caldera. Ambas imágenes fueron tomadas desde un dispositivo de realidad virtual Quest 3.

5. Análisis de resultados

Iniciando con un enfoque puramente cualitativo, el resultado obtenido visualmente al implementar la técnica de modelado por *Low Poly* tiene mucho mejor calidad que el del

modelo originalmente creado con fotogrametría, ya que daría la impresión de estar frente a una caldera cuyos componentes han tenido el mantenimiento estético externo necesario para dar la apariencia de un sistema nuevo, a diferencia de la calidad visual que se obtiene con fotogrametría ya que ese modelo da la apariencia de tener impactos y deformaciones en la superficie de la caldera como resultado de la imprecisión en la superposición de las mallas creadas por cada imagen a pesar de utilizar algoritmos de visión por computadora y aprendizaje de máquina sofisticados, lo cual resulta en una apariencia descuidado y que podría causar desmotivación en los usuarios para ser aprovechado. Es así como, para este modelo, se puede causar mayor atracción y motivación al usuario ofreciéndole un modelo mejor cuidado visualmente como resultado de usar la técnica de *Low Poly* (figura 9).



Figura 9. Modelo Low Poly final desde diferentes vistas.

Ahora bien, continuando con un análisis cuantitativo, desde los parámetros de rendimiento gráfico del modelo creado, en la figura 10 se muestran distintas ventanas de interfaz con información que será discutida a continuación.

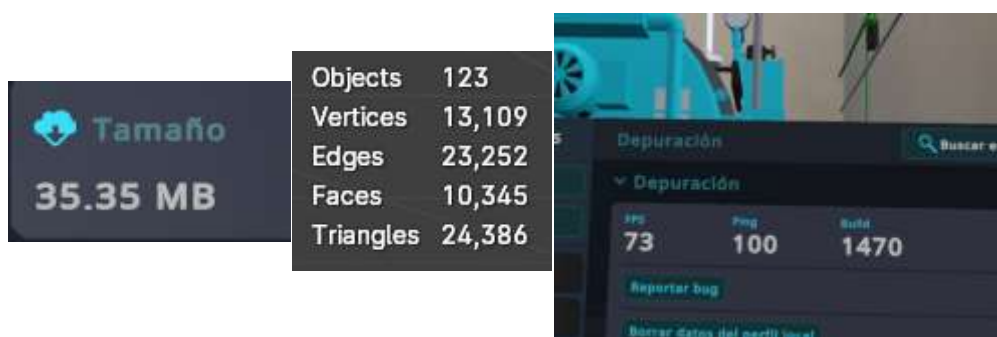


Figura 10. A la izquierda se muestra el peso del ambiente virtual en VRChat, al centro se muestra la cantidad de triángulos que requiere el modelo de la caldera con Low Poly, y a la derecha se aprecian los cuadros por segundo (FPS) desde un dispositivo de realidad virtual.

En la tabla 1 se muestra una relación entre los parámetros en ambos modelos para poder compararlos e identificar las mejoras obtenidas con el rediseño.

Tabla 1. Parámetros entre ambos modelos

Parámetro	Fotogrametría	Low Poly	Mejora porcentual
Cantidad de triángulos en Blender	594,249	24,386	96 %
Tamaño en VRchat	49.74	35.35	29 %
Cuadros por segundo (FPS)	0*	73	100 %

Primeramente el valor de 0 cuadros por segundo para el modelo de fotogrametría corresponde a que en pruebas anteriores no era posible siquiera visualizarlo en dispositivos móviles ni en visores ya que el excesivo peso causaba que al tenerlo en el punto de vista el dispositivo de ejecución se congelara y terminara la aplicación, es decir, sólo era un modelo utilizable en equipos de cómputo personal, por lo que al compararlo con los 73 FPS que alcanza el rediseño con *Low Poly* en dispositivos móviles, se determina que la ganancia es total por hacerlo compatible con todos los dispositivos a los que se apunta con la plataforma seleccionada.

Por otra parte, con base en lo que las referencias de cómputo gráfico consultadas mencionaban, entre menor sea el conteo de triángulos más sencillo será procesar un modelo, factor que debe tenerse en cuenta al desarrollar entornos inmersivos ya que, a diferencia de modelos estáticos, estos están siendo renderizados en todo momento para corresponder a la posición espacial que ocupe el usuario dentro del ambiente, por lo cual se considera que al utilizar únicamente 4 % de los triángulos que se ocuparon en el modelo de fotogrametría, el modelo de *Low Poly* requerirá muchos menos recursos computacionales para su procesamiento, lo cual coincide con los FPS obtenidos y que se discutieron en el párrafo anterior.

Finalmente, al disminuir en, prácticamente, 30 % el peso del ambiente virtual, la ganancia podría repercutir en los tiempos de descarga que requiere un usuario al ingresar a este recurso a través de la plataforma inmersiva, recordando que al ser este un recurso que estará contenido en un servicio web, su peso repercute en el tiempo que debe esperar el usuario para acceder al mismo en función de su conexión al proveedor de internet; si se asume una conexión básica de 10 Mbps de descarga, el tiempo que le tomará a un usuario potencial acceder al contenido del modelo elaborado por fotogrametría sería de 40 segundos, mientras que para el de *Low Poly* sería de 28 segundos. En las pruebas

realizadas con la red pública a la que tienen acceso los estudiantes de la universidad se detectó una velocidad de 40 Mbps con lo que se estima un tiempo de descarga de 7 segundos. Estos resultados podrían parecer irrelevantes, pero no se puede desestimar que, con la tendencia a la baja de la retención de atención, los contenidos que son más fáciles y rápidos de acceder por los usuarios son aquellos con mayor capacidad de ser aprovechados (consumidos, digitalmente hablando), es por ello que también se considera que este resultado apoyará a que el recurso sea elegido por el usuario al poder proveérselo con la mayor inmediatez posible, en función de los diferentes escenarios de las redes que utilice.

6. Conclusiones

Si bien, desde la documentación que se encuentra referente a ambas técnicas de modelado se puede identificar que cada una tiene ventajas y desventajas sobre la otra, en general la elección entre fotogrametría y *Low Poly* depende del contexto y los requisitos del objeto que se pretende obtener como resultado. En el caso de este trabajo en particular no se abordaron discusiones respecto a otros equipos de adquisición de imágenes estereoscópicas o software de post procesamiento ya que salían del interés del equipo de trabajo al no disponer de tales herramientas. Si bien el trabajo se concentró en el equipo y entorno en particular al que tiene acceso el equipo de trabajo, los resultados pudieran ser de interés para otros profesionales por abordar un escenario basado en estándares y componentes industriales.

La fotogrametría se recomienda para aplicaciones que demandan alta precisión y realismo, pero para que la técnica de fotogrametría funcione correctamente, se requieren de condiciones ideales de iluminación que deben ser creadas con equipo semi profesional, lo cual no se consideró al realizar el primer modelo de la caldera, sumado a que el ambiente en el que se ubica cuenta con muy poca iluminación natural, deficiente iluminación artificial (para este fin), y espacios reducidos que complican colocar equipos adicionales de iluminación, lo anterior puede ser una de las razones por las que se obtuvieron resultados tan complejos tanto para su post procesamiento en la reconstrucción del modelo, como para su despliegue en cómputo gráfico. Por otra parte, la técnica de *Low Poly* es perfecta para proyectos que necesitan eficiencia y una estética estilizada sin llegar al realismo. En general, las referencias recomiendan tomar una decisión basada en el equilibrio entre calidad visual, recursos de cómputo disponibles (tanto para la creación como para el despliegue del modelo), y objetivos específicos buscados, con base en los resultados obtenidos también se podría determinar que si el modelo tiene geometrías que partan de cuerpos primitivos, entonces es innecesario aplicar técnicas como fotogrametría por muy sofisticadas y vanguardistas que sean, siendo este trabajo un claro ejemplo de no forzar el empleo de una tecnología sólo por ser innovadora o emergente.

Gracias a la técnica de *Low Poly*, se logró obtener un modelo con todos los detalles que componen a una caldera de un espacio educativo, basada en un sistema real, con un peso adecuado para su despliegue en una plataforma inmersiva gratuita y compatible con los tres dispositivos en los que se puede ejecutar la misma; la implementación de *Low Poly* resultó muy práctica y permitió resolver los problemas inherentes a la técnica anteriormente utilizada.

Finalmente, al modelar las piezas una a una se tendrá un mejor control posteriormente para agregarles algunas otras características en el ambiente virtual como pueden ser comportamientos acorde a físicas programadas, o animaciones como podría ser al caso de los botones para representar alguna interacción con el usuario, permitiendo que, a diferencia del modelado monolítico que se obtiene con fotogrametría, la nueva caldera virtual pueda seguir evolucionando como recurso educativo conforme se le vayan agregando funciones o sustituyendo/actualizando algunos de sus componentes en función del uso que se le quiera dar.

7. Bibliografía

[1] Çeken, B., Kübra , K., & Merve, M. (2018). *Dijitalden doğan illüstrasyon tekniği: Low Poly*. SED - Sanat Eğitimi Dergisi. Traducido con Google Translate.

<https://www.sanategitimidergisi.com/makale/pdf/1540198408.pdf>

[2] Domínguez Colin, R., & Rodríguez Hernández, L. M. (2021, septiembre). *Guía de construcción de modelos 3D con fotogrametría y software libre*. INNOVACIÓN y DESARROLLO TECNOLÓGICO REVISTA DIGITAL. https://iydt.wordpress.com/wp-content/uploads/2021/09/3-15_guia-de-construccion-de-modelos-3d-con-fotogrametria-y-software-libre-1.pdf

[3] Santoso, B. A. (2018). Three Dimensional Visualization of Agape Wonosobo Basic School Building with Lowpoly Method. www.academia.edu. https://www.academia.edu/120441048/Three_Dimensional_Visualization_of_Agape_Wonosobo_Basic_School_Building_with_Lowpoly_Method

[4] Palomo, L. (2023, 21 septiembre). *Low Poly, ¿qué es y para qué sirve este tipo de modelado?* Animum 3D. <https://www.animum3d.com/blog/que-es-low-poly/#:~:text=Esta%20t%C3%A9cnica%20se%20basa%20en,una%20aparici%C3%A9n%20estilizada%20y%20geom%C3%A9trica.>

[5] Why do 3D engines use triangles to draw object surfaces? (s/f). Educative. <https://www.educative.io/answers/why-do-3d-engines-use-triangles-to-draw-object-surfaces>

[6] Carlos, R. (2024, abril 18). *¿Por Qué Está Lenta tu GPU? 8 Razones por las que tu GPU Puede Estar Rindiendo por Debajo de lo Esperado y Cómo Solucionarlo*. Blog Ibericavip. <https://ibericavip.com/blog/pc-workstation/por-que-esta-lenta-tu-gpu-8-razones-por-las-que-tu-gpu-puede-estar-rindiendo-por-debajo-de-lo-esperado-y-como-solucionarlo/>

El difícil camino hacia la autonomía universitaria

Mercado Reyes Santos, MRS, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

mrs@azc.uam.mx

1. Resumen.

Se reflexiona aquí sobre el origen de las universidades en México: ¿fueron agentes privados que arriesgaron su propio capital para fundar instituciones que respondieran a exigencias del mercado o fueron ocurrencias de políticos en turno?. La importancia de su origen (mercado o política), radica en la dinámica que aplicarán: ¿tendrán un desarrollo según su capacidad de satisfacer los gustos y necesidades de la sociedad o estarán supeditadas a los vaivenes y caprichos de los políticos en turno?. Se pone especial énfasis en el tema de autonomía universitaria y su relación con el esquema de financiamiento. Aunque no se ha tenido demasiada resistencia en otorgar la autonomía a las universidades públicas y privadas tal parece que dicha autonomía no ha tenido todos los efectos planeados y esperados. Aquí se expresa una conjetura y una propuesta para recuperar el espíritu de la autonomía universitaria como requisito para lograr el desarrollo óptimo de las instituciones universitarias.

2. Introducción

Tres posibles formas en que surge una universidad. 1. La primera universidad es la Al Karaouine, se fundó en Marruecos por la esposa de un acaudalado comerciante. 2. La segunda universidad es la de Bolonia y fue fundada, dos siglos después, por una orden religiosa. 3. La tercera se da por invasión del Estado en la educación y es relativamente reciente, no va más allá de dos siglos. Se reconoce que fue el canciller de Prusia quien, en el siglo XIX, inició una actividad sobresaliente en el tema de universidades financiadas con impuestos.

La primera universidad en México fue la Real y Pontificia Universidad de México, fundada por una orden religiosa en 1551. En 1910 empieza la instromisión del Estado a nivel universitario. En efecto, Porfirio Díaz inaugura la Universidad de México. Con ello se inaugura una política activa del poder político no solo para fundar universidades, también escuelas normales, preparatorias, bachilleratos, secundarias, primarias y prescolares. Díaz nombra a Joaquín Egía Lis como primer rector de la Universidad de México. También el gobierno nombró a José Vasconcelos y Antonio Caso antes de otorgar la autonomía. Luego, los rectores fueron nombrados por una junta directiva de funcionarios de la UNAM y hasta la fecha, así se hace.

Se le denomina “universidad pública” a las instituciones educativas creadas por el gobierno con recursos del erario. El gobierno determina el lugar, expropia o compra los terrenos, decide la arquitectura de los edificios, contrata al personal docente, decide los sueldos y salarios y diseña los planes y programas de estudio. Es una práctica estatal impulsada por el dictador austriaco Otto von Bismarck desde mediados del siglo XIX con el fin de tener el control del pensamiento de los individuos.

El nombramiento de autoridades de parte del gobierno en turno, en las universidades públicas, creaba un ambiente de restricción, impedía el libre desarrollo de la institución pues todo estaba sujeto a la aprobación de la autoridad impuesta por el presidente de la República. Para todo, se tenía que pedir permiso en planes y programas, los profesores se cuidaban de no contrariar a la autoridad para no perder el puesto de trabajo y muchos de los académicos eran recomendados del gobierno. Se respiraba un ambiente tóxico. Algo había que cambiar.

3.Lucha por la autonomía.

Desde principios del siglo pasado se detectó la importancia de que las instituciones universitarias no estuvieran sujetas al poder político. En todos los renglones de la vida universitaria se comprendía que supeditarse a las órdenes o caprichos de los gobernantes impedía un desarrollo pleno, del pensamiento, teorías y discusión libre de las ideas. El hecho de que el gobernante impusiera a las autoridades administrativas daba lugar a la llegada de gente que poco interés tenía en el desarrollo de las instituciones y muchas veces se daba el puesto principal a castigados o premiados del gobierno que se comportaban como verdaderos monarcas. Las pocas voces independientes de estudiantes y profesores convencieron a la comunidad universitaria para exigir la autonomía y, en efecto, se logró después de movilizaciones, huelgas y violencia. El acuerdo, con el presidente Emilio Portes Gil se dio en los siguientes términos:

3.1Autonomía Universitaria significa tres cosas:

- a) Capacidad plena de la Universidad para gobernarse a sí misma: elegir a sus autoridades, determinar las formas de gobierno, organización y toma de decisiones, así como darse la legislación que requiera.
- b) Posibilidad de administrar sus recursos de acuerdo con sus necesidades; tanto los edificios de su propiedad o bajo su administración, como el inventarios y los recursos provenientes del subsidio estatal, donaciones o los propios que pueda generar.
- c) Libertad de cátedra, para que los académicos puedan desarrollar sus tareas con libertad para elegir enfoques y metodología, sin directriz institucional, ni presiones del poder, siempre y cuando cumplan con los planes de estudio¹.

3.2.La trampa.

El gobierno de Emilio Portes Gil concedió la autonomía en un 26 de julio de 1929. Fue un día de fiesta y alegría para todos los universitarios. El gobierno mostró una gran empatía con la causa que no solo se sumó a la fiesta sino que, mostrando su simpatía anunció su apoyo ofreciendo toda clase de ayuda y, sobre todo, le apoyaría financieramente con recursos del erario. Nadie podía sospechar el daño a futuro que encerraba ese apoyo. En realidad, se convertía en un “Caballito de troya”, es decir, una mano venenosa pero con guante de terciopelo que parecía imposible de causar un daño. Sin embargo, esa mano gubernamental que ha otorgado generosos recursos dinerarios “para el buen desarrollo de la institución” terminó por destrozar la autonomía universitaria (“el que paga, manda). Hoy en día las universidades públicas autónomas se encuentran en una crisis profunda: Hay poco desarrollo de ciencia, no se generan patentes, la deserción llega al 90% de los jóvenes que ingresan, los profesores están desmotivados, los costos por formar a un titulado son excesivos, se generan largas huelgas de casi un año con las pérdidas de recursos y la mayoría de los nuevos profesionistas solo aspiran a encontrar un empleo que les garantice las quincenas, con sueldos bajos y sujetos a incrementos anuales del 3 o 4% ordenados por el gobierno. Y lo peor es que se pierden miles de jóvenes que pudieron haber sido generadores de empresas, creadores de nuevos puestos de trabajo, nuevos negocios, etc.

Se puede observar que nuestras instituciones, UNAM, IPN, UAM y todas las universidades de los Estados tienen poco efecto en la sociedad, en realidad, están divorciadas de la sociedad, del sector empresarial, comercial y financiero. Las universidades públicas no se interesan en que los alumnos dominen perfectamente otros idiomas, por lo menos el inglés. La mayoría de los académicos no saben inglés, no leen artículos científicos escritos en inglés, no se les fomenta un espíritu de emprendurismo y tal pareciera que están enemistados con un sistema económico competitivo. De hecho, alumnos y profesores ven con desden al sistema empresarial, al mercado y, en general, al capitalismo.

3.3.Subsidio a la oferta

Automáticamente se genera fenómeno ideológico. Se desarrolla una cultura sesgada hacia la izquierda y no solo se observa en la Ciudad de México, sino en todas las universidades públicas y privadas de provincia. Los fenómenos de corrupción, nepotismo, gigantismo, estancamiento y burocratismo y sindicalismo se deben principalmente a una sola variable: Esta es, el esquema de financiamiento de “subsidio a la oferta” es decir al flujo de dinero que va del gobierno hacia la institución. Así lo construyó el canciller Otto Bismark y así generó ese hilo fino de control estatal.

4.Fin de la autonomía

Por ahora, se pondrá toda la atención en el efecto natural que causa el subsidio a la oferta sobre la autonomía de la Institución. Como dice el refrán popular: “el que paga, manda”. Es casi una ley de la economía. En efecto, todo se supedita a la cantidad de recursos que el gobierno destine a la institución. No se puede construir un nuevo edificio si no se autoriza por el gobierno y no destina recursos para ese fin, no se puede comprar un reactor si no lo aprueba el gobierno, ¿Entonces, dónde quedó la autonomía? Se puede observar que cualquier universidad pública, que vive del erario, se convierte en una burocracia, sin cerebro, sin interés por innovar, ni tomar decisiones propias. El personal que la conforma no necesita pensar sino sólo cumplir las órdenes del jefe o cumplir los programas diseñados por alguna oficina gubernamental.

4.1. Universidades privadas sin autonomía

Este fenómeno también se observa en universidades privadas, que no están financiadas con dinero del erario. Por ejemplo, el ITESM (Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey) se ha convertido en una burocracia privada con 26 campus, sin autonomía propia, pues están gobernados desde la central en Monterrey.

Las universidades públicas, creadas de esta manera, naturalmente se transforman en instituciones burocráticas propicias para el despilfarro de recursos, robo y saqueo donde los más beneficiados son los que alcanzan los altos puestos directivos y las mafias sindicales; florece el nepotismo pues hay la facilidad de colocar a los parientes, amantes, amigos, etc. Los recursos que recibe la autoridad universitaria se desperdician en gastos inútiles o innecesarios. Los alumnos se convierten en el pretexto para seguir recibiendo recursos “*ad infinitum*”; los sindicatos aprovechan la oportunidad de inflar la plantilla con personal innecesario.

4.2. ¡No importan las pérdidas!

Las universidades públicas no sienten la necesidad de preocuparse por la rentabilidad, pues se jactan de no ser negocios, y por tanto, no se preocupan por las pérdidas. Otro fenómeno notable es que se convierten en nido propicio para las corrientes de izquierda. Se difunde extensamente la línea marxista como pensamiento único, rechazando u hostilizando al pensamiento liberal, ignoran a los pensadores de la Escuela Austriaca de Economía a pesar de tener grandes académicos de Premio Nobel. También se puede observar los altos niveles de desertión. De cada 100 alumnos que ingresan, solo llegan a titularse el 10 o 15% a pesar de que en varias se ha abolido el requisito de hacer una tesis y se les otorga el título con sólo aprobar todas sus asignaturas.

Si estos fenómenos solo se observaran en una determinada universidad pública bastaría, quizás, cambiar a los directivos, despedir a algunos o a todos los profesores, aumentarles el salario al doble para que se preocuparan por hacer bien su trabajo, pero nada de esto funciona. El fenómeno es bastante generalizado. De hecho, no se conoce de una sola universidad subsidiada que realmente sea autónoma y eficiente.

Las autoridades universitarias prometen cumplir bien, rendir cuentas, gastar sin despilfarros para que el gobierno las siga subsidiando. El Estado les sigue dando recursos y les da el derecho de elegir a sus autoridades, seleccionar a sus docentes, establecer sus sueldos, determinar prestaciones y servicios, etc. pero tampoco ha servido, ya que siguen sin tener eficiencia terminal y/o avances significativos.

4.3. Eliminar el modelo de subsidio a la oferta

Realmente se necesita analizar a fondo el modelo de universidad pública que se aplica desde décadas atrás. Hace 200 años o más, el gobierno no se metía en el campo educativo. Eran los particulares, es decir, los que no pertenecían al aparato estatal, quienes educaban a los niños y jóvenes. El potentado contrataba a un letrado para educar a sus hijos, o bien, alguna orden religiosa o una asociación privada se disponía a fundar escuelas y universidades. En realidad, se estaba dejando que el mercado, se manifestara para saber cuantas escuelas faltaban, cuántas normales o universidades se requerían y de que tipo.

Si el canciller Otto von Bismarck realmente se hubiera preocupado por construir un buen sistema educativo, solo tenía que invitar a los agentes privados a fundar escuelas y universidades; a la banca u otros organismos con recursos podría haberlos incentivado, no obligado, para que otorgaran créditos a largo plazo para personas o asociaciones que tuvieran interés en crear instituciones educativas de todo tipo. Así se habría formado un mercado competitivo de educación en todos los niveles. Las instituciones capaces de satisfacer los gustos, necesidades o anhelos de los alumnos sobrevivirían y desaparecerían las incompetentes. Bismarck pudo haber influido para la creación de instituciones que otorgarían financiamiento a todo joven o ciudadano que quisiera instruirse. Así es como nadie tendría la excusa de no estudiar por falta de recursos. El banco le prestaría lo suficiente para pagar la colegiatura, sus gastos de alimentación, viajes, habitación, etc. y cuando ya estuviera ejerciendo su profesión empezaría a regresar el crédito.

Pero Bismarck estaba más preocupado por construir un gobierno que tuviera el control total de la sociedad. No pensó el dictador que el mercado podía resolver el tema educativo. No solo Bismarck adoptó el modelo de control estatal de la educación, también lo hizo Adolfo Hitler, Lenin, Stalin, Fidel Castro y desaparecieron las escuelas privadas. Pero, aún en la Alemania de hoy día, casi todas las escuelas y universidades están en manos del Estado, con directivos de izquierda, como en los viejos tiempos del Führer. Es un mal ejemplo de sistema educativo de un país que se precia de no ser comunista.

La tarea es transformar el sistema estatista de educación en un sistema educativo competitivo, dinámico y que pueda brindar formación profesional a cualquier joven que desee instruirse.

4.4. La clave está en el esquema de financiamiento

El primer paso es cambiar su sistema de financiamiento. En lugar de que el gobierno le envíe los recursos monetarios a la institución, eso debe desaparecer totalmente. La idea es que el subsidio se envíe a la demanda, es decir, al alumno. Se hace mediante un cheque o

voucher a nombre del alumno, intransferible y que únicamente sirve para pagar la colegiatura en la escuela o universidad que el alumno elija para recibir instrucción.

No se estaría gastando más dinero. El presupuesto que está destinado a una escuela se divide entre el número de alumnos y luego entre doce. Así se determina el monto de cada voucher que el alumno recibe cada mes. Es importante que sea la mano del alumno quien coloca el cheque en la escuela donde está matriculado. Y debe ser con periodicidad mensual, para garantizar que funcione.

El fundamento de esta propuesta radica en que se introduce la disciplina del mercado en el sistema educativo. En efecto, desde el momento en que las escuelas viven de las colegiaturas, es decir, del cliente, se empiezan a preocupar por dar un buen servicio con la esperanza de que ese cliente esté dispuesto a seguir pagando, mes a mes. Es decir, se introduce la variable RIESGO, que es el motor que obliga a una empresa o institución a dar un buen servicio al cliente. Como consecuencia, las otras escuelas también estarán deseosas de recibir vouchers, luego, tendrán que competir, ofreciendo mejores planes de estudio, mejores profesores, etc. Por supuesto, aquellas instituciones que no sean capaces de dar excelentes servicios desaparecerán por su propia incompetencia. Lo cual es perfectamente sano para la población estudiantil y para toda la sociedad.

4.5. ¿Y la gratuidad de la educación?

Nótese que no se está hablando de eliminar la gratuidad de la educación ni de privatizar las instituciones, temas que deberán discutirse posteriormente. Introducir el sistema de subsidio a la demanda para eliminar el sistema de subsidio a la oferta es el primer paso necesario para lograr la autonomía de escuelas y universidades. Los profesores, investigadores, administradores y trabajadores de la institución podrán reunirse para decidir libremente, es decir, sin intervención del gobierno, cómo distribuir el dinero ingresado por los vouchers. Determinarán el salario de cada docente, de cada trabajador, del rector y lo suficiente para mantenimiento o ampliación del plantel. Aprenderán así a administrar su propia institución. Con toda seguridad las escuelas empezarán a cambiar su visión de futuro, su filosofía para volverse más afines a un mundo de libertad donde el individuo sea el centro del universo. En otras palabras, con el subsidio a la demanda es más probable que abandonen esa visión izquierdista que anula el valor de la persona.

Aunque el cambio en el sistema de financiamiento es un gran paso, no es suficiente para lograr la autonomía universitaria tan anhelada, es necesario un punto más; se requiere sacar las manos del gobierno. Quiere decir que es necesario eliminar todo tipo de control por parte del Estado. Esto incluye evitar el control o supervisión del gobierno mediante alguna institución burocrática. Pero todo movimiento de dinero, ingresos y gastos deben subirse a la red para que todos estén informados. Al final, los títulos o grados académicos deben ser otorgados por la institución educativa y no por el gobierno.

En el caso de universidades privadas también aplica la necesidad de fomentar la autonomía universitaria. Cada campus de Tecnológico de Monterrey debería comportarse

como una universidad independiente, autónoma y libre de contratar a los profesores y empleados, poner sus propias colegiaturas, diseñar sus propios planes y programas de estudio sin estar sujetos o incorporados a la UNAM, SEP y otras instituciones del gobierno.

Es de justicia reconocer que el ITESM ha generado resultados significativos y diferentes que la universidad pública. Por ejemplo, el ITESM es la universidad que ha generado más patentes que cualquier otra universidad. Pero han fracasado en cuanto a la formación de empresarios porque adolecen del mismo problema estructural que las universidades públicas: los profesores son, fundamentalmente, burócratas de quincena. Dicho de otra manera, no son dueños, copropietarios ni accionistas de la institución.

4.6.El valor de la autonomía.

Una vez que se entiende el valor de la autonomía y que ésta no se logra con incluir el nombre de “autónoma”, sino que está asociado a la forma de vivir de una institución. En realidad, para que una institución disfrute de autonomía administrativa y académica solo puede ser sobre la base de “Autonomía financiera”, es decir, que no reciba fondos públicos. Si la UNAM sigue viviendo del subsidio que le da el gobierno, es imposible que disfrute de autonomía. Lo mismo para el Tec de Monterrey, si los dineros llegan de la central de Monterrey, es imposible que cada campus disfrute de autonomía.

5.Vivir del cliente, no del gobierno.

Entender esto significa aceptar que las instituciones deben vivir del cliente, no del gobierno, y vale para la UNAM o el Tec de Monterrey. Cuando un gobierno entiende la necesidad y el valor de la autonomía, puede hacer el cambio de manera rápida en las escuelas y universidades públicas. En efecto, bastaría decirle al alumno que acuda a un banco cercano donde le darán un cheque que solo sirve para pagar en la escuela o universidad donde está inscrito. La escuela le extiende un recibo con el cual el alumno acude, al siguiente mes por otro cheque y así va pagando la colegiatura. Al Estado no le costaría prácticamente nada hacer este cambio. Si no se tiene toda la confianza, se puede aplicar en cualquier Estado de la República, por ejemplo en el Estado de Veracruz. O bien, aplicarlo a una universidad, digamos a la Universidad Veracruzana, o a nivel de secundarias, o tan solo de una secundaria y observar el comportamiento de los directivos, profesores y trabajadores, los cuales, con toda seguridad desempeñarán mejor sus funciones.

5.1.El caso UAM

Suponiendo, en el peor de los casos, que el gobierno no estuviera interesado en introducir este cambio de financiamiento, la UAM la puede aplicar, en uso de la autonomía que

según disfruta. En efecto, los recursos los recibe rectoría y en lugar de asignarlos a cada unidad, rectoría se transforma en la distribuidora de vouchers para los alumnos. El alumno de la Unidad Azcapotzalco, Iztapalapa, Xochimilco, Cuajimalpa o Lerma, acude a la rectoría para recibir el voucher y pagar en la unidad de su preferencia. Esto lo haría cada mes. Cualquiera de las unidades empezaría a mejorar sabiendo que vive del pago del alumno.

Pero aún se puede profundizar más el tema de autonomía. En efecto, se le puede dar autonomía a cada división de, digamos, la Unidad Azcapotzalco. Es decir, el alumno paga a la división donde está inscrito (DCBI, DCSH, DCAD).

5.2. ¿Se puede dar más autonomía?

En efecto, se puede llevar a nivel de Departamento. Éste, a su vez, actuaría como una institución autónoma dentro de la universidad. Los profesores adscritos decidirían allí sus sueldos, el número de asistentes, los contratos, etc. Estoy seguro que esto causaría un dinamismo, y todos ganaríamos.

5.3. Experiencias

La primera vez que se aplicó el sistema de vouchers fue en Milwaukee en 1990, se vio que era bueno y se extendió para todo el Estado de Wisconsin; luego se implantó a nivel universitarios en Suecia. Actualmente se aplica ya en Argentina con el gobierno de Javier Milei² y se está extendiendo en muchos lugares del mundo.

6. Conclusión

Cambiar el flujo de financiamiento es condición *sine qua non* para iniciar la reforma del sistema educativo, no es suficiente pero es la base para darle mejor autonomía a las universidades, para aprovechar el talento de académicos e investigadores, para formar profesionistas con el perfil que necesita nuestro país, capaces de tomar riesgos, de fundar nuevas empresas, generar fuentes de empleo, etc. El subsidio a la oferta ha sido un sistema que ha dañado a las universidades, pero que se puede cambiar si se tiene la voluntad, coraje y decisión de crear algo mejor para nuestro pueblo.

7. Bibliografía

1. Friedman Milton. Libertad de Elegir. Editorial Planeta. 1978
2. West E.G. La educación y el Estado. Union Editorial. 1994
3. Mises von Ludwig. La acción humana. Union Editorial 1980
4. Boragina. La educación. Editorial Argentina. 2010

5. 4. Mercado Reyes Santos. El fin de la educación pública. 2012.

Método didáctico de caracterización fotoeléctrica LED-Fotodiodo

Guadarrama Santana Asur¹, Martínez Gutiérrez Daniel², García Valenzuela agosto¹

¹ Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología UNAM.

² Facultad de Ingeniería UNAM.

asur.guadarrama@icat.unam.mx

1. Resumen

El presente trabajo describe una metodología práctica y didáctica para la caracterización fotoeléctrica de Diodos Emisores de Luz y Fotodiodo, con el fin de entender su funcionamiento en forma práctica basándose en los datos más significativos de las especificaciones técnicas del fabricante para cada dispositivo optoelectrónico. Se utilizó una cámara oscura cilíndrica en donde se colocaron los dispositivos optoelectrónicos por medio de monturas intercambiables en cada extremo de la cámara. De esta forma, se pudo obtener solamente la contribución de la fuente de luz emitida en el fotodiodo, aislando la luz ambiente de este. Se implementaron los circuitos de acondicionamiento electrónico básicos, para el LED y fotodiodo, en tabletas para prototipos y se utilizó equipo de instrumentación de laboratorio como fuente de alimentación, multímetro y trazador de curvas portátil para medir y registrar señales eléctricas de voltaje en función de la intensidad de luz a diferentes longitudes de onda emitidas y recibidas, con una relación señal a ruido adecuada.

2. Introducción

La utilización de dispositivos optoelectrónicos en el área de la instrumentación requiere de la comprensión de conceptos teóricos que son la base de los datos de especificaciones técnicas dadas por los fabricantes. En la práctica muchas veces no se le da la importancia a varias de estas especificaciones técnicas y solamente se atienden las relacionadas a la corriente y voltaje aplicados al dispositivo. Sin embargo en el diseño de un sistema de medición es necesario tomar en cuenta otras especificaciones técnicas para aprovechar al máximo su funcionalidad y su tiempo de operación, evitando su deterioro o daño temprano.

El presente trabajo describe una metodología práctica con fines didácticos para la caracterización fotoeléctrica de Diodo Emisor de Luz LED y Fotodiodo FD, con el fin de comprender su funcionamiento, utilizando los datos de especificaciones técnicas de cada dispositivo. Para el desarrollo de la metodología propuesta primero se caracterizaron diferentes LEDs con su respectiva longitud de onda λ utilizando un generador de curvas comercial. Se registraron los voltajes de operación de cada LED a una corriente de operación constante sin rebasar su valor máximo permitido para no dañar el dispositivo.

Después se utilizó una cámara oscura cilíndrica COC en donde se colocaron los dispositivos fotoelectrónicos LED y FD, por medio de monturas intercambiables en cada extremo de esta, con el fin de aislar la luz ambiente del FD y obtener solamente la contribución de la fuente de luz emitida en el fotodetector. Se implementaron los circuitos de acondicionamiento electrónico básico, para cada dispositivo, en tabletas para prototipos y se utilizó equipo de instrumentación de laboratorio como fuente de alimentación, multímetro y trazador de curvas portátil para realizar las mediciones requeridas y obtener los resultados en cada actividad propuesta. Se registraron señales eléctricas de voltaje con una relación señal a ruido S/R adecuada, en función de la intensidad de luz y longitud de onda emitida por el LED y recibida por el FD.

En este caso solo se utilizó un fotodiodo FD PIN, el cual presenta una respuesta de alta velocidad cuando se opera con un voltaje inverso^[1]. Sin embargo, es posible aplicar esta metodología con otros fotodetectores como fotoresistencias o fototransistores en actividades didácticas para temas relacionados en áreas de Instrumentación, Física o Química a nivel de Bachillerato o Licenciatura.

3. Condiciones experimentales

Se utilizó un generador de curvas comercial para caracterizar las fuentes de luz LED de diferente longitud de onda λ a una corriente de operación constante para obtener su voltaje de operación. Se realizó un barrido de voltaje para cada LED y se compararon sus curvas de operación I_f / V_f . Después se implementó un circuito de acondicionamiento electrónico para limitar la corriente de operación a 20 mA en cada LED utilizado y se obtuvo su voltaje de operación máximo. Estos se compararon con los obtenidos anteriormente.

3.1 Monitorización del voltaje de operación de LEDs con generador de curvas

Se utilizó un generador de curvas para dispositivos electrónicos semiconductores PEAK atlas DCA Pro, modelo DCA75, figura 3.1(a). Se caracterizaron 8 LEDs más uno RGB (Rojo, Verde, Azul) con su respectiva longitud de onda λ . Se obtuvieron sus voltajes de operación V_f en función de una corriente constante de operación $I_f = 5$ mA, como se muestran en la figura 3.1(b).



(a)

LED	V_f [V]	I_f [mA]
Infrarojo	1.113	5
Rojo	1.696	5
Ambar	1.943	5
Amarillo	1.927	5
Verde	2.035	5
Blanco	2.691	5
Azul	2.713	5
Violeta	2.987	5
LED RGB		
Rojo	1.925	5
Verde	2.484	5
Azul	2.730	5

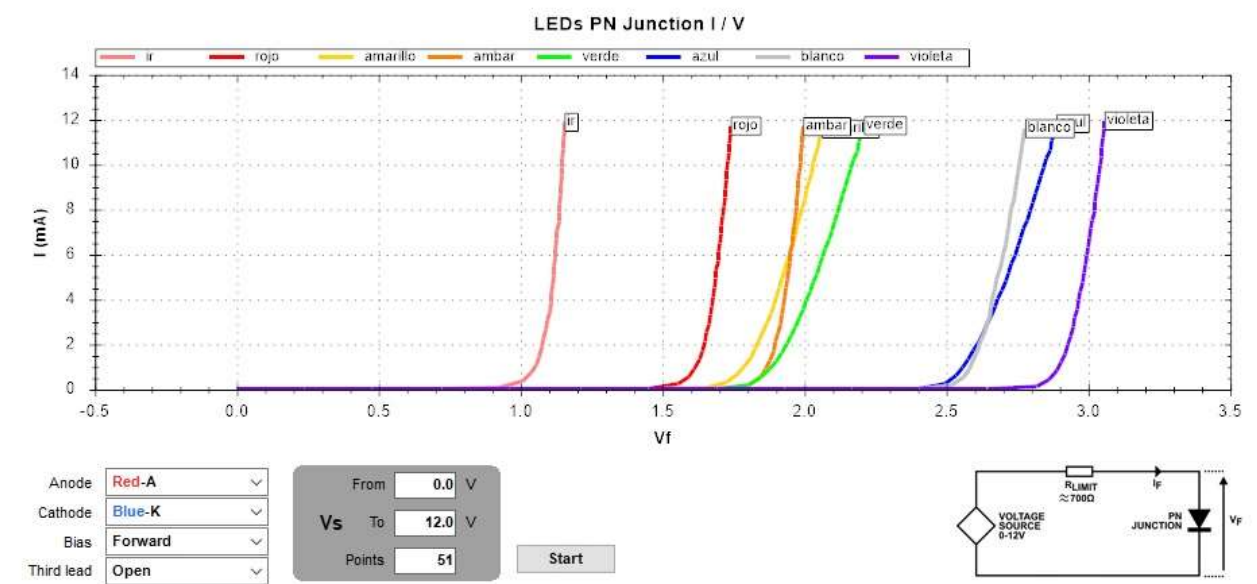
(b)

Figura 3.1. (a) Medición del voltaje de operación del LED V_f con el generador de curvas y (b) tabla de valores de V_f manteniendo $I_f = 5$ mA.

Los datos de la figura 3.1(b) muestran que el voltaje de operación del LED V_f aumenta conforme la longitud de onda del LED λ disminuye manteniendo la corriente de operación $I_f = 5$ mA constante. Esta es una característica de los LEDs.

3.2 Obtención de curvas I_f / V_f con el generador de curvas.

Las curvas I_f / V_f de cada LED utilizado se obtuvieron utilizando un software propio de la marca PEAK en una computadora. En este caso se realizó un barrido de voltaje en directa entre el ánodo A y el cátodo K de cada LED. Las condiciones de voltaje, el circuito electrónico utilizado así como las curvas obtenidas con el generador de curvas se muestran en la figura 3.2.



mostrado, desde uno en el infrarojo cercano (ir) hasta otro en el violeta. Abajo de las graficas se

muestran los valores mínimo y máximo de voltaje utilizados para realizar un barrido de voltaje con el circuito electrónico que utiliza el generador de curvas.

Como se puede observar el voltaje V_f para cada LED aumenta al disminuir su λ , como se mostró en los datos de la figura 3.1(b). También se puede observar que para un V_{fmax} corresponde una I_{fmax} , como se muestra en la tabla 3.1 para 5 LEDs.

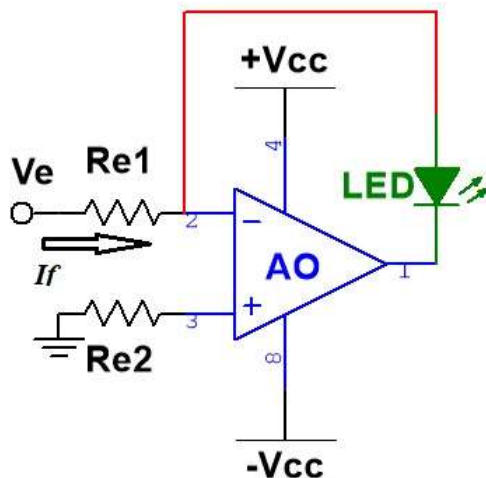
Tabla 3.1. Valores de voltaje de operación V_{fmax} para corrientes de operación I_{fmax} para cada LED.

LED	V_{fmax} [V]	I_{fmax} [mA]
infrarojo	1.155	11.5
rojo	2.039	11.66
Verde	2.72	11.72
Azul	2.88	11.04
blanco	2.77	11.63

Los datos obtenidos muestran que es posible variar el voltaje V_{fmax} en el LED y obtener una I_{fmax} de operación para que el LED no sufra daños. Este valor de corriente de operación es significativo y se puede encontrar en las especificaciones técnicas del fabricante, por lo general se encuentra alrededor de los 20 mA, dependiendo del fabricante^[2]. Este valor de corriente también es válido para LEDs comerciales que no cuentan con información técnica.

3.3 Control de corriente de LEDs

Anteriormente se mencionó que es posible controlar la corriente de operación I_f del LED variando su voltaje de operación V_f con el fin de mantenerla en un valor que no lo deteriore. El generador de curvas utiliza el circuito electrónico mostrado en la figura 3.2 para limitar la corriente que



pasa por el LED, sin embargo en este caso, se requiere que la corriente de operación I_f se mantenga constante en 20 mA con diferentes LEDs y su respectiva longitud de onda. Para realizar esto, es necesario que la corriente I_f sea proporcional al voltaje V_f aplicado al LED el cual es diferente para cada λ , como se mostró anteriormente. En la figura 3.3 se muestra el circuito propuesto en donde el voltaje positivo aplicado V_e mantiene constante la corriente requerida que pasa por el LED. Realizando un análisis de corrientes y voltajes del circuito propuesto se obtiene la siguiente expresión para calcular la corriente que pasa por el LED como,

$$I_{led} = I_f = \frac{V_{in}}{R_{e1}} \quad (3.1)$$

Figura 3.3. Circuito de control de corriente CCC proporcional al voltaje de entrada V_e .



El circuito de la figura 3.3 se implementó con un amplificador operacional AO TL072 con alimentación variable $\pm V_{cc}$ de $\pm 5V$ a $\pm 6V$ y resistencias $R_{e1} = R_{e2} = 110 \Omega$. En cada caso, el voltaje V_e aplicado al LED varió en el rango mencionado con voltaje positivo $+V_{cc}$ hasta alcanzar la corriente de operación $I_f = 20$ mA, la cual se monitorizó con un multímetro digital. En este caso y solo con el fin de utilizar una fuente de alimentación bipolar variable, figura 3.4, se propuso que $V_e = +V_{cc}$ por lo que el voltaje bipolar $\pm V_{cc}$ de alimentación del AO TL072 también varió para cada LED, en el rango de voltaje mencionado.

Figura 3.4. Arreglo experimental para obtener los voltajes de operación V_f en función de la corriente de operación I_f de cada LED con diferente longitud de onda.

Con la metodología descrita se obtuvieron los voltajes de operación V_f en función de una corriente de operación $I_f = 20$ mA en diferentes LEDs comerciales con diferente longitud de onda de emisión (color), incluyendo un LED RGB HV-5RGBXX^[2]. Los voltajes de operación se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Valores de voltaje de operación V_f en función de la corriente de operación $I_f = 20$ mA para diferentes LEDs comerciales con su respectiva longitud de onda de emisión (color).

LED	V_e [V]	V_f [V]	I_f [mA]	R_{e1} [Ω]
Infrarojo	5.0	1.18	20	110
Rojo	5.3	1.84	20	110
Ambar	5.4	2.02	20	110
Amarillo	5.5	2.27	20	110
Verde	5.6	2.38	20	110
Blanco	5.8	2.94	19.8	110
Azul	5.9	3.10	19.9	110
Violeta	6.0	3.23	20.1	110
LED RGB				
Rojo	5.5	2.19	20.1	110
Verde	5.9	3.02	20.1	110
Azul	5.9	3.01	19.9	110

Como se puede observar para una corriente de operación $I_f = 20$ mA el voltaje de operación V_f aumenta cuando la longitud de onda de emisión del LED disminuye. Los resultados obtenidos presentan la misma tendencia que con los datos obtenidos a diferentes valores de I_f con el generador de curvas de la figura 3.1 y tabla 3.1. En la figura 3.5 se muestran las curvas I_f / V_f dadas por el fabricante del LED RGB utilizado^[2].

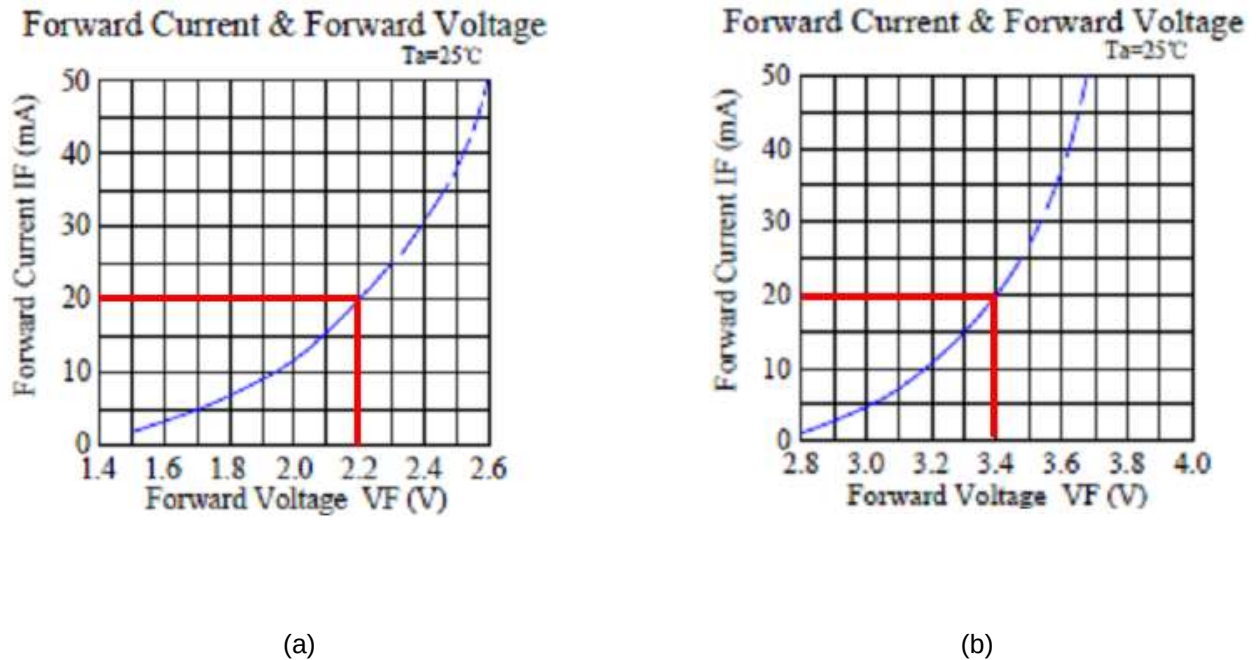


Figura 3.5. Curvas I_f / V_f del LED RGB. a) rojo R y b) verde G, azul B. Inolux Data Sheet 2015.

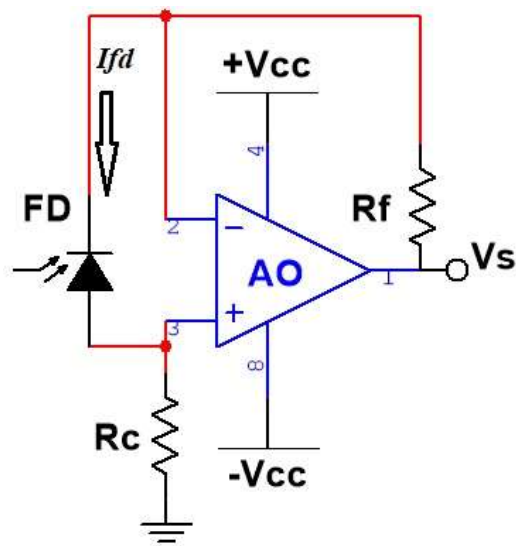
Se puede ver que para el LED RGB, correspondiente al rojo R, los valores de I_f / V_f de la figura 3.5(a) corresponden con los obtenidos en la tabla 3.2. Sin embargo, para los valores de la figura 3.5(b) correspondientes al verde G y azul B, se nota una diferencia mayor a la obtenida coincidiendo solo en un mismo valor. Esta diferencia puede deberse a la metodología utilizada en las mediciones con el circuito de acondicionamiento propuesto junto con la temperatura.

Esta metodología de caracterización eléctrica puede ser conveniente cuando se utilizan LEDs comerciales que no cuentan con información técnica del fabricante, como fue en este caso para algunos LEDs utilizados.

3.4 Caracterización de fotodiodos con LEDs

Los fotodetectores se pueden utilizar como transductores para obtener una variable eléctrica en función de una variable óptica, con el fin de poder cuantificarla en forma de una señal de voltaje o de

corriente. En este caso se utilizó un fotodiodo FD del tipo PIN^[1] FD PIN BPV10 de Vishay Semiconductors^[3] para detectar la intensidad de luz de diferentes longitudes de onda λ provenientes de LEDs. Se implementó una etapa de acondicionamiento electrónico al fotodiodo FD, conocida como etapa de transimpedancia. La función de esta fue la de obtener una señal eléctrica de voltaje en función de una corriente inversa generada por el FD cuando incidió luz sobre su superficie fotosensible proveniente de una fuente de luz, emitida por un LED a una determinada λ . Para realizar la función de conversión de corriente a voltaje se propuso el circuito electrónico de transimpedancia CTI, que se muestra en la figura 3.6.



Este circuito se diferencia de un circuito de transimpedancia básico por la resistencia $R_c = 100\text{k}\Omega$ la cual mejora la ganancia del circuito en función de la corriente del fotodiodo I_{fd} y la resistencia de realimentación $R_f = 100\text{k}\Omega$, además aprovecha la entrada diferencial del AO para disminuir el voltaje de offset en la entrada del circuito. Haciendo $R_f = R_c$ se obtiene un balance para aumentar el rechazo de ruido^[4]. Realizando un análisis de corrientes se obtuvo la expresión para calcular el voltaje de salida V_s como,

$$V_s = I_{fd}(R_f + R_c) \quad (3.2)$$

Figura 3.6. Circuito electrónico de transimpedancia CTI para fotodiodo.

3.5 Caracterización de respuesta fotoeléctrica de FD con LEDs en una Cámara Oscura Cilíndrica

Para realizar una caracterización de respuesta fotoeléctrica confiable de un fotodiodo FD con una fuente de luz LED fue necesario que el FD recibiera solamente la intensidad de luz emitida por la fuente. Esto fue posible aislando al máximo la luz ambiente de la superficie fotosensible del FD con una Cámara Oscura Cilíndrica COC, la cual se muestra en la figura 3.7.

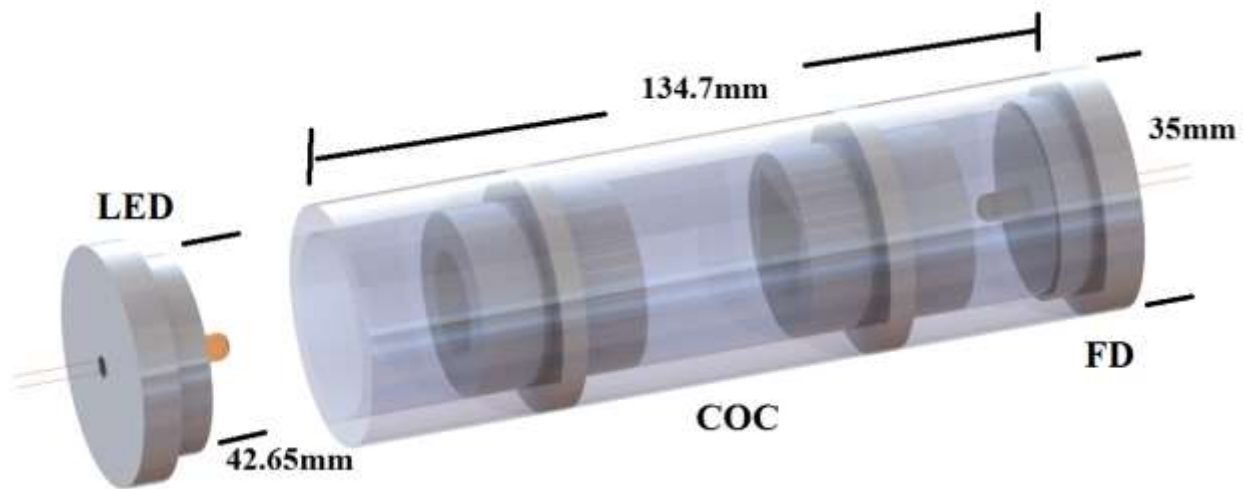


Figura 3.7. Esquema semitransparente de la Cámara Oscura Cilíndrica COC con los dispositivos optoelectrónicos montados en sus respectivas monturas en cada extremo.

La COC se fábrica con PVC con una longitud de 134.7 mm, diámetro interno de 35 mm y diámetro externo de 42.65 mm. Cuenta con dos monturas circulares intercambiables en donde se colocaron la fuente de luz LED y el fotodiodo FD, uno en cada extremo de la COC, como se muestra la imagen semitransparente de la figura 3.7.

La caracterización de respuesta fotoeléctrica se realizó con el mismo FD PIN BPV10 de Vishay Semiconductors y con cinco fuentes de luz LED con su respectiva λ , incluyendo el LED RGB utilizado anteriormente. La corriente de operación I_f en cada LED se mantuvo en un valor constante de 20 mA variando el voltaje V_e del circuito de control de corriente CCC de la figura 3.3, de acuerdo a los valores de la tabla 3.2 obtenidos con el mismo CCC. Para el FD se implementó el circuito de transimpedancia CTI, mostrado en la figura 3.6. El LED y el FD se colocaron en sus respectivas monturas en cada extremo de la COC con el fin de aislar la luz ambiente y así detectar la mayor radiación de luz emitida solo por las fuentes, como ya se mencionó anteriormente. En la figura 3.8 se muestra el diagrama esquemático de conexiones del arreglo experimental utilizado para realizar las mediciones correspondientes.

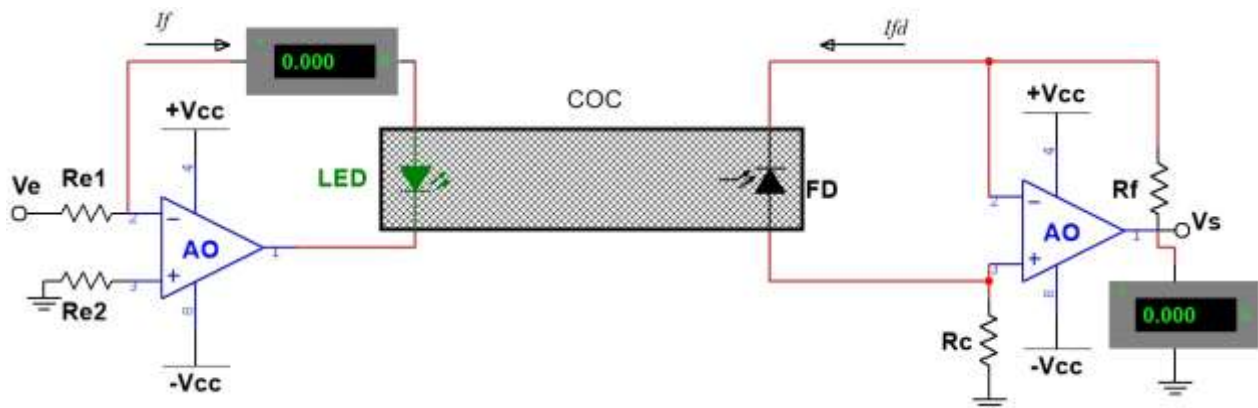


Figura 3.8. Diagrama esquemático de conexiones con LED, COC y FD.

En la figura 3.9 se muestra el arreglo experimental propuesto con la COC para medir la corriente de operación I_f de los LEDs utilizados así como de los voltajes de salida V_s del circuito de transimpedancia CTI con un multímetro digital, utilizando el FD como dispositivo fotodetector.

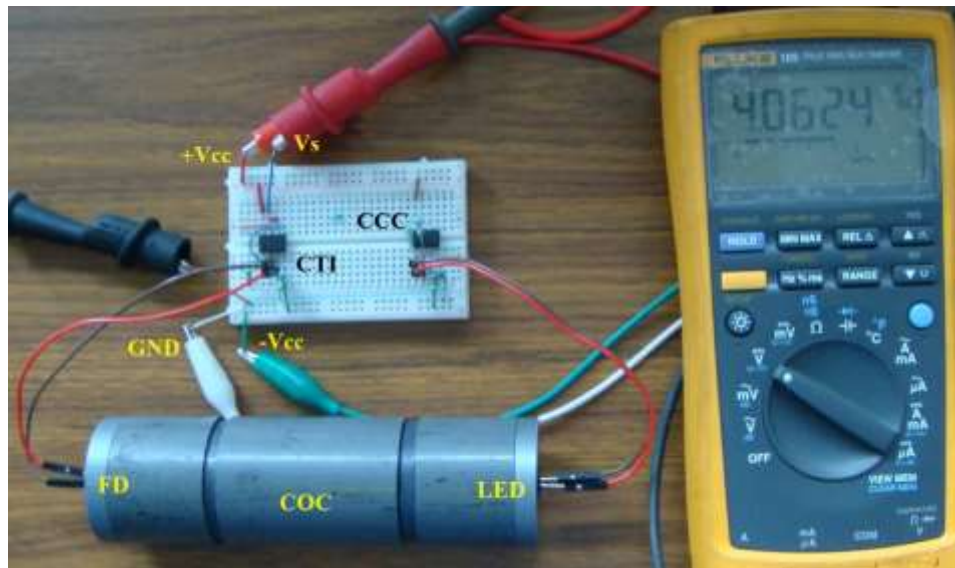


Figura 3.9. Arreglo experimental para caracterizar la respuesta de un FD con LEDs de diferente longitud de onda λ a una corriente de operación constante $I_f = 20$ mA.

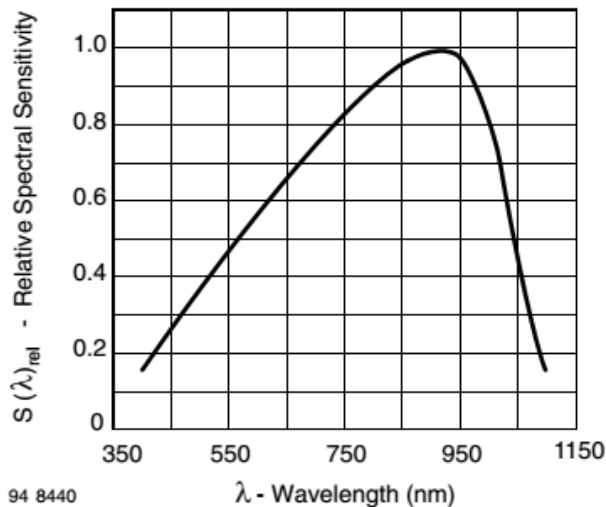
4. Resultados y discusión

Los valores de voltaje V_s registrados con la metodología de medición y el arreglo experimental de la figura 3.9 se obtuvieron rotando la montura de la fuente de luz LED, con el fin de asegurar una alineación óptima con el FD y así alcanzar un valor de voltaje máximo, manteniendo una separación constante entre el LED y el FD dentro de la COC. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Voltajes de salida V_s del CTI en función de la corriente generada por el FD con diferentes LEDs y su correspondiente λ en condiciones de oscuridad dentro de la COC, manteniendo su corriente de operación $I_f = 20$ mA.

Acondicionamiento electrónico Dispositivo Optoelectrónico	CCC LED	CTI FD
	I_f [mA]	V_s [V]
LED (λ) Infrarojo (cercano)	20	4.0
Blanco (-)	19.8	4.26
LED RGB (λ) Rojo (623 nm)	19.8	0.43
Verde (520 nm)	20.1	0.73
Azul (470 nm)	19.9	1.03

Los resultados de la tabla 3.3 muestran que el FD presenta una mejor sensibilidad a una λ en el infrarojo cercano la cual se refleja en los voltajes de salida V_s del CTI correspondientes a los LEDs que emiten en el infrarojo cercano y también con luz blanca, la cual se encuentra en un rango de λ en el visible y probablemente un porcentaje en el infrarojo cercano. En el caso del LED infrarojo se obtiene un voltaje V_s mayor con respecto de los obtenidos con el LED RGB, que presentan menor V_s para cada λ correspondiente. La respuesta del FD con el LED infrarojo concuerda con los datos de las especificaciones técnicas del fabricante del FD utilizado^[3], en las cuales se indica una sensibilidad pico en $\lambda = 920$ nm, como se muestra en la curva de sensibilidad espectral relativa y longitud de onda



de la figura 3.10. Este es otro parámetro importante para obtener un desempeño máximo del fotodetector utilizado, en este caso un FD PIN. La metodología para caracterización fotoeléctrica descrita puede ser utilizada con otros fotodetectores como fototransistores y fotoresistencias.

Figura 3.10. Curva de sensibilidad espectral relativa vs longitud de onda del FD PIN. VISHAY, 2002.

5. Conclusiones

La metodología de medición propuesta para caracterizar LEDs y FD se puede utilizar con otros fotodetectores, como fototransistores y fotoresistencias, con fines didácticos para comprender el funcionamiento básico de estos dispositivos optoelectrónicos, en forma práctica. También puede servir para complementar los conceptos teóricos que abarcan temas de optoelectrónica e instrumentación a niveles de bachillerato y licenciatura en Ingeniería Eléctrica para cursos de física y electrónica.

Agradecimientos

Al Técnico en Fabricación David García Flores y por el apoyo en el diseño, maquinado y fabricación de las Cámaras Oscuras Tubulares.

6. Bibliografía

1. Chapter 02. Si photodiodes

<https://www.hamamatsu.com/us/en.html>

Disponible en: <https://es.escribd.com/document/394457408/e01-Handbook->

Introduction, [Consultado enero-2023]

2. Inolux, Data Sheet No. HV-5RGBXX series, July 21, 2015. Version of 1.1

3. Vishay Semiconductors (Rev. 1.9, 22-Nov-11) www.vishay.com

4. Graeme J., "Photodiodes Amplifier, OP AMP solutions", New York, Ed. McGraw-Hill. (1996)

Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia en la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

Casas Robles Eduin Itzayana , Flores Valverde Erasmo, Valladares Rodríguez María Rita, Cerezo Clemente Joahan, Espinoza Castañeda Marisol

efv@azc.uam.mx , mariaritaauam@gmail.com, al2193040490@azc.uam.mx,
marisol.ec.uam@gmail.com

**Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Depto. De Ciencias Básicas
Av. San Pablo 420, Col. Nueva el Rosario, C.P 02128, Alcaldía Azcapotzalco ,Ciudad de
México, CDMX**

1. Resumen

La CDMX está viviendo una crisis de agua cada vez más grave ya que millones de personas carecen de un acceso digno y seguro, al menos 250 mil personas viven sin conexión a la red y millones más tienen un servicio intermitente o reciben agua contaminada. El modelo actual está haciendo que la situación tarde o temprano colapse, no es difícil pensar que la actual crisis de agua en la ciudad no es un problema de escases sino del mal manejo de agua y que afortunadamente tiene solución.

El desarrollo del diseño de un sistema de captación de agua de lluvia en la UAM-A que presenta el siguiente trabajo de investigación, pretende contribuir a solucionar el problema de desabasto de agua en la ciudad, mediante su aprovechamiento ya que un metro cuadrado de techo en la ciudad puede captar 766 litros de agua al año en promedio además el diseño puede ser replicable en otros sitios con características similares.

Los resultados que se obtuvieron en la evaluación de la calidad del agua mostraron que cuando ésta toca una superficie de captación adquiere características indeseables como color y turbiedad. Los resultados del tratamiento del agua proponen un proceso de pre-filtración o cribado, filtración y desinfección con cloro manteniendo la calidad de agua dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP) conforme a lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

2. Introducción

La escasez de agua va en aumento convirtiéndose en un tema de preocupación mundial, se prevé que la demanda mundial de agua aumente un 55% en 2050, debido principalmente a las crecientes necesidades de la industria, la producción térmica de electricidad y el uso doméstico [1]. La contaminación, deforestación, la sobreexplotación de acuíferos y el aumento desmedido de la población, han minimizado las reservas de agua que abastecen a muchas ciudades, como la Ciudad de México [2].

La Ciudad de México se ubica en una cuenca cerrada y el material con la que se ha construido, no ha permitido la captación de agua de lluvia lo que significa que una enorme cantidad de agua no tiene una salida natural provocando inundaciones [3]. Por otro lado la sobreexplotación de los acuíferos acelera el hundimiento de la ciudad: 10 metros en los últimos 100 años [4]. El modelo hidráulico del Sistema Lerma-Cutzamala es la segunda fuente que surte de agua a la Ciudad de México [3] y tiene la capacidad de suministrar, en promedio 485 millones de metros cúbicos anualmente [6], este modelo es insustentable y no cumple con la demanda actual, México está viviendo una crisis de agua cada vez más grave y millones de personas carecen de un acceso digno y seguro [4], sólo en la Ciudad de México al menos 250 mil personas viven sin conexión a la red y millones más tienen un servicio

intermitente o reciben agua contaminada [4]. El modelo actual está provocando que la situación tarde o temprano sea insostenible.

Si a todo lo mencionado anteriormente le sumamos los problemas sociales, ambientales y económicos relacionados con el modelo hidráulico actual, no es difícil pensar que la actual crisis de agua en la CDMX se debe a las malas decisiones en el manejo de agua y que afortunadamente ha permitido la elaboración de algunas propuestas para solucionar este problema [2].

La precipitación pluvial constituye una parte importante del ciclo hidrológico, ya que produce el agua renovable del planeta, aunque hay que considerar que varía regional y estacionalmente. También es importante reconocer que es el único medio de abastecimiento de agua dulce para el planeta y del cual se obtienen las reservas de agua [6]. La CDMX tiene una precipitación media anual de 800 mm (1 milímetro de lluvia equivale a 1 L/m² de área de captación) de superficie en promedio [5]. Es importante señalar que la distribución mensual de la precipitación acentúa los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso, debido a que el 68% de la precipitación normal ocurre entre los meses de junio y septiembre. El recurso de agua de lluvia, tras un proceso de limpieza también debería ser aprovechado para recargar los acuíferos abatidos. Se estima que el 71.6% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.2% escurre por los ríos o arroyos y el 6.2% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos [6].

La práctica de captar y utilizar el agua de lluvia que se descarga de las superficies duras impermeables o poco permeables como los techos de viviendas o el escurrimiento de suelos, son técnicas ancestrales que están recuperando su aplicabilidad. La captación de agua de lluvia es una solución muy importante para las grandes urbes en donde se está gastando más agua de la que se dispone. En la CDMX si se captara toda la lluvia en los techos y en algunos suelos, se podría ahorrar de 10% a 15% del agua que se consume en los hogares. Si se aprovechara el 3% de la lluvia que cae cada año en el país, alcanzaría para suministrar agua no potable para usos como limpieza o sanitarios a 13 millones de personas por año [7].

3. Condiciones experimentales

Evaluación de la calidad de agua de lluvia.

La toma de muestras consistió en tomar muestras en diferentes días y horarios para poder llevar a cabo la evaluación del agua de lluvia. Las muestras de agua se tomaron en diferentes pisos del edificio "W" de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco (UAM-A) y los sitios fueron: planta baja, segundo piso, tercer piso y la azotea, esto se hizo con la finalidad de comparar la calidad de agua de lluvia a diferentes alturas y si existen interferencias. Estas muestras se tomaron del mismo punto de captación donde se planea a partir de ahí el diseño del sistema. La mayoría de los muestreos se llevaron a cabo en el tercer piso ya que se evaluó la caída de agua más cercana al punto de muestreo esto con la finalidad de reducir el CO₂ presente en el agua para facilitar la evaluación del parámetro de acidez y asumiendo que la mayoría de las casas habitación

constan de al menos un piso. Esta evaluación también permitió conocer y comparar las muestras de agua en relación al área de captación, sin limpieza y con limpieza previa. El muestreo se realizó en el periodo del mes de septiembre del 2016 durante los eventos de lluvia. El periodo de muestreo se realizó durante estas fechas debido a la disponibilidad del recurso pluvial en el sitio de muestreo.

En la Tabla 1 se enuncian los parámetros físicos, fisicoquímicos y microbiológicos determinados en los puntos de muestreo y la técnica utilizada conforme a la normatividad.

Tabla 1. Parámetros físicos, fisicoquímicos y microbiológicos

Parámetros	Norma	Técnica utilizada
Temperatura (°C)	NMX-AA-007-SCFI-2013	Termometría
pH (U de pH)	NMX-AA-008-SCFI-2011	Potenciometría
CE (µs/cm)	NMX-AA-093-SCFI-2012	Conductimetría
Color (U ptCo)	NMX-AA-045-SCFI-2001	Escala cobalto platino
Turbiedad (UTN)	NMX-AA-038-SCFI-2001	Nefelometría
Metales pesados (mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectrofometría de absorción atómica
Acidez (mg/L CaCO ₃)	NMX-AA-036-SCFI_2001	Método de prueba
SST (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2012	Gravimetría
Solidos Sedimentables (mg/L)	NMX-AA-034-SCFI-2012	Volumetría
	NOM-112-SSA1-1994	

Coliformes totales (NMP/100ml)		Número más probable (NMP)

Propuesta de tratamiento de agua de lluvia

El agua de lluvia adquiere la mayor contaminación cuando es captada en una superficie como el techo, se propone un tratamiento con las siguientes etapas para su potencial aprovechamiento

- **Prefiltrado/acribado:** Es un dispositivo que puede fácilmente retirar manualmente los sólidos de gran tamaño, separa los materiales de acuerdo a su tamaño de partícula individual, éste retiene los sólidos grandes como ramas, piedras, insectos.
- **Filtración:** Se llevó a cabo en una botella de plástico transparente de 2 litros, las muestras de agua de aproximadamente 1 litro se hicieron pasar por el filtro, el cual consta de las siguientes capas: capa de piedra, de grava, de arena y carbón activado, al final se le colocó un tapón para que el material no se vertiera, el tapón de algodón se sustituyó por uno de fibra de vidrio para evitar la proliferación de bacterias.
- **Desinfección:** El proceso de desinfección seleccionado es cloración ya que tiene un costo razonable es de fácil manejo y dosificación segura.

Diseño de sistema de captación

En la Figura .1 en la parte superior se muestra una imagen completa del edificio y en la inferior se señala sólo el área de captación propuesta, a la derecha se muestra un plano del área de captación con sus correspondientes medidas. De acuerdo a esto el *área total de captación efectiva es de 51.92 m²*

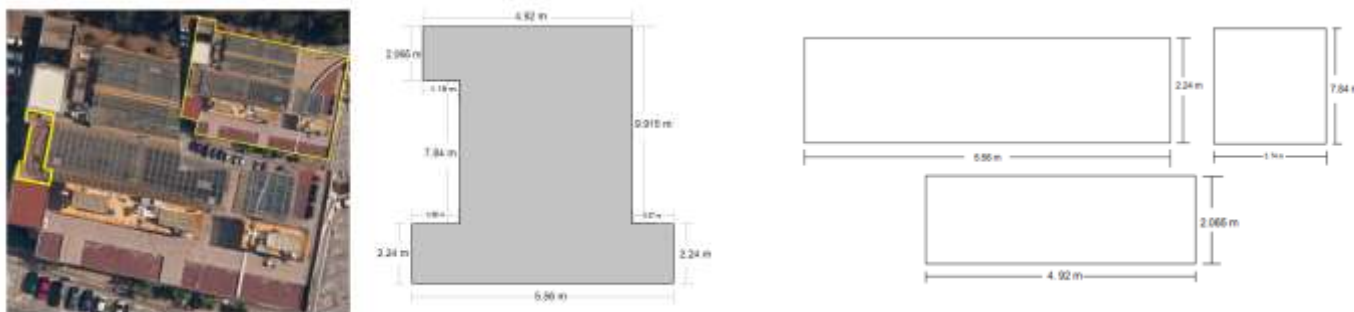


Figura 1. Área de captación del sistema de agua de lluvia

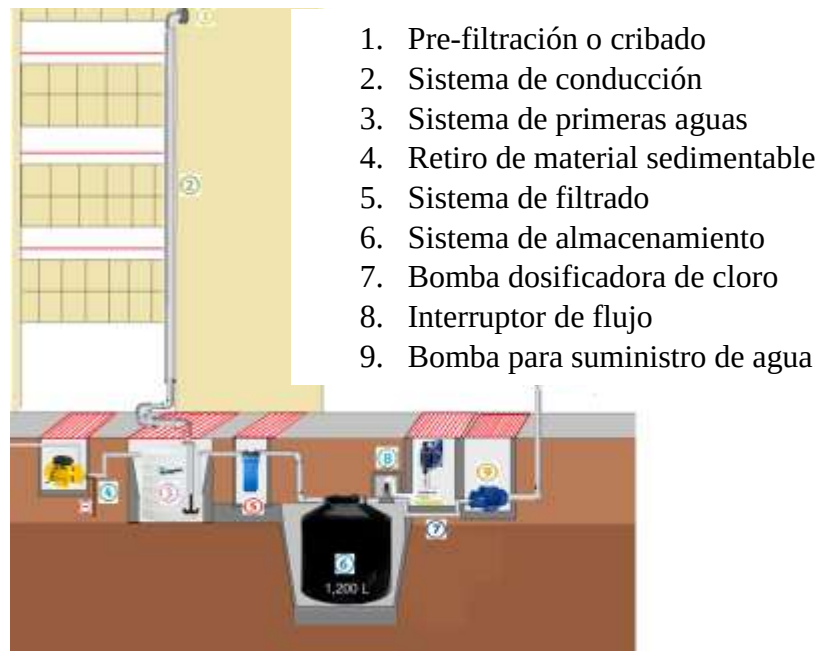


Figura 2. Propuesta de diseño del sistema de captación de agua de lluvia para el Edificio W.

Antes de conducir el agua al sistema de almacenamiento se recomienda colocar un dispositivo que retire y filtre los contaminantes que puede arrastrar el agua a su paso por las superficies, como pueden ser sedimentos, metales, grasas y basuras. De esta forma el agua llega de mejor calidad al sistema de almacenamiento

En el punto 1 se esquematiza el sistema de cribado o filtración por malla (Figura 2), este se debe colocar justo a la entrada del punto de muestreo, partiendo de una entrada de 2" de diámetro.

En el punto 2 se ilustra un sistema de conducción de PVC que por gravedad transportara el agua al sistema de primeras aguas.

El punto 3 se ilustra un sistema de primeras aguas que contendrá en su interior un reductor de turbulencia, esto permite que el agua entre a la cisterna de forma calmada y no revuelva los sedimentos que se acumulan en el fondo y también una pichancha flotante que permitirá que la bomba succione agua por debajo del nivel más alto, evitando transportar sedimentos del fondo, mejorando la calidad del agua. En su exterior contendrá un contra piso de concreto como soporte y muros de contención que lo protejan además de una reja para su posible mantenimiento.

En el punto 4 se ilustra el sistema de bombeo que constará de una bomba periférica que retirará el material sedimentable del fondo del sistema de primeras aguas y desplazará el material sedimentable hacia otro lugar. Esta bomba en su exterior contendrá un contra piso de concreto como soporte y muros de contención que la protejan además de una reja para su posible mantenimiento.

En el punto 5 se ilustra el sistema de filtrado que en su exterior consta de un vaso comercial para filtración de agua de lluvia y en su interior consta de un cartucho de tela externa y malla de polipropileno, fabricado con cáscara de coco que permite una alta capacidad de remoción de cloro, retención de sedimentos y no desprende partículas de carbón. Este filtro en su exterior contendrá un contra piso de concreto como soporte y muros de contención que la protejan además de una reja para su posible mantenimiento o remplazo de filtros.

En el punto 6 se ilustra el sistema de almacenamiento se propone una cisterna de 1,200 litros el cual consistirá en un tanque liviano enterrado que tendrá como soporte un contra piso de concreto y muros de contención que lo protejan. En su interior contendrá con una pichancha flotante que permite que la bomba (Punto 9) succione agua por debajo del nivel más alto, evitando transportar sedimentos del fondo de la cisterna y mejorando la calidad del agua.

En el punto 7 se ilustra la bomba automática de dosificación de cloro cuya función será la de succionar y dosificar el cloro en la línea de alimentación

En el punto 8 se ilustra el interruptor de flujo, que es un controlador de la bomba automática dosificadora de cloro, el cual al detectar flujo de agua en la tubería enviará una señal a la bomba que a su vez iniciará la dosificación de cloro, por el contrario si hubiera una interrupción en el flujo de agua ya sea por paros en el sistema de bombeo general o falla en los servicios, el interruptor enviará la señal a la bomba, la cual detendrá la dosificación hasta que el flujo de agua sea restablecido. Este sistema de control además de evitar el desperdicio de cloro eficientará el gasto energético, toda vez que la bomba sólo actuará cuando sea necesario. La instalación de este equipo se realiza en la tubería de alimentación a los tanques de agua. Este en su exterior se encontrará protegido con concreto y muros de contención que la protejan.

Finalmente en el punto 9 se ilustra una bomba centrífuga que conducirá el agua al punto de aprovechamiento (llave de paso), esta bomba en su exterior contendrá un contra piso de concreto como soporte y muros de contención que la protejan además de una reja para su posible mantenimiento.

4. Resultados y discusión

En la *Tabla 3*. Se presentan los resultados obtenidos en la evaluación y caracterización de las muestras de agua de lluvia

Tabla 3. Caracterización de agua de lluvia

MUESTRA	Color (Pt Co)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/L)	pH	CE (μ s/cm)	Acidez (mg CaCO ₃ /L)	Coliformes T (NMP/100ml)
1	29	7	3	7.1	44.2	1	No detectable
2	56	7	4	7.2	21.8	2	No detectable
3	89	5	7	7.2	103.2	3	No detectable
4	7	2	4	7.7	65.5	1	No detectable
5	179	24	22	6.96	62.8	5	No detectable
6	150	25	28	6.72	61.9	3	No detectable
7	159	22	22	6.46	194.7	4	No detectable
8	18	4	8	6.73	34.5	5	No detectable
9	123	14	17	7.33	80.1	6	No detectable
10	87	19	16	7.21	35.7	5	No detectable
11	15	3	4	6.48	14.2	3	No detectable
12	63	9	10	6.66	19.4	4	No detectable

Resultados de la propuesta de tratamiento

Respecto a los resultados obtenidos en la caracterización del agua de lluvia a continuación en la Tabla 2. Se muestran los resultados después de que las muestras fueron sometidas al proceso de tratamiento propuesto.

Tabla 2. Resultados obtenidos de la propuesta de tratamiento

MUESTRA	Color [Pt Co]	Turbiedad [NTU]	SST [mg/L]	pH	CE [μ s/cm]	Acidez [mg de CaCO ₃ /L]	Temperatura [°C]	Coliformes T [NMP/100ml]	Cloro Libre [mg/L]
1	20	3	5	5.96	652	288	16.2	No detectable	1.5
2	8	4	0	5.1	172	51	15	No detectable	1.49
3	9	3	5	6.59	69	10	15.1	No detectable	1.49
4	0	4	0	7.01	118	9	15.6	No detectable	1.48
5	9	3	0	6.72	48	30	16	No detectable	1.5
6	7	5	5	6.76	65	12	16	No detectable	1.49
7	18	1	2	6.55	72	6	16.5	No detectable	1.49
8	0	0	3	6.57	32	4	15.9	No detectable	1.49
9	8	2	0	6.53	103	3	16.5	No detectable	1.48
10	20	2	2	6.34	67	2.4	18.9	No detectable	1.49
11	8	0	3	5.99	57.7	8	19	No detectable	1.5
12	10	6	2	6.23	63.8	2.5	19.5	No detectable	1.49

5.Conclusiones

El agua de lluvia captada del techo de la UAM-A antes de tocar una superficie de captación cumplió con la mayoría de los parámetros como: color verdadero, turbiedad, SST, sólidos sedimentables, CE conforme los LMP enunciados de la NOM-127-SSA1-1994 comparada con el agua captada por los 3 pisos (planta baja, 2do piso, 3er piso).

El tren de tratamiento primario propuesto que consto de un pre-filtrado, filtrado y desinfección cumplió con el control de la contaminación física, fisicoquímica y microbiológica en todas sus etapas.

El diseño de aprovechamiento pluvial está compuesto de los principales elementos: a) captación; b) recolección y conducción; c) interceptor; y d) almacenamiento, además de otros componentes, es sencillo y puede ser replicable e instalable con conocimientos técnicos básicos y ayuda de la obra civil, eléctrica e hidráulica. Es factible desde el ámbito técnico, económico y social. El costo aproximado es de \$40,000 mxn y tiene un retorno de inversión entre 2 años.

6.Bibliografía

[1] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y Cultura UNESCO (2015). Agua para un mundo sostenible. Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo 2015. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002322/232272s.pdf>

[2] García, V.J.H. (2012). “Sistema de captación y aprovechamiento Pluvial para un Ecobarrio de la Cd de México”, México, D.F. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental .Facultad de Ingeniería, UNAM., México.

[3] Repensar la Cuenca (2010). La gestión de Ciclos del Agua en el Valle de México. Disponible en: <http://cuencavalledemexico.com/wpcontent/uploads/2010/04/Introduccion.pdf>

[4] Isla Urbana (2015). Problema / Captación. México. [Última fecha de consulta 20 de febrero de 2016]. Disponible en: <http://islaurbana.org/#>

[5] Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2014). Clima en México. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional Gerencia de Meteorología y Climatología Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. Reporte Anual 2014 Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/analisis/reporte/Anual2014.pdf>

[5] Guzmán R.S.F (2014): “SISTEMA DE CAPTACIÓN AGUAS PLUVIALES ADAPTABLES A CASAS HABITACIÓN”, Huajuap de León, Oaxaca. Tesis (Ingeniería en Diseño). Universidad Tecnológica Mixteca, Oaxaca, México.

[6] Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2014). Estadísticas del agua en México. Edición 2014. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>

[7] Soluciones Hidropluviales (2016). [Última fecha de consulta: 28 de Enero del 2016] Disponible en: <http://hidropluviales.com/captacion-agua-de-lluvia/>

La tecnología aplicada en las salas virtuales es una necesidad en Instituto de Geología.

Montaño-Cuahuilaz, F. ¹, Silva-Esquivel A. ².

²Instituto de Geología, UNAM.

paco@geologia.unam.mx, asilva@geologia.unam.mx

1. Resumen

Durante la pandemia, el Instituto de Geología de la UNAM implementó una solución tecnológica para continuar con sus actividades académicas y administrativas mediante la integración de Zoom en su plataforma interna, Intranet. A través de una API, se automatizó la creación de sesiones virtuales, permitiendo a los usuarios programar y gestionar reuniones directamente desde la plataforma interna del Instituto. Esta implementación facilitó la transición al trabajo remoto, manteniendo la continuidad de proyectos, reuniones y eventos académicos sin interrupciones. Además, la integración de Zoom permitió una mayor flexibilidad en la programación de actividades, adaptándose a las necesidades individuales de cada equipo. Gracias a esta solución, la comunidad del Instituto pudo responder pronta a la necesidad de mantenerse conectados, además de iniciarse con 2 licencias que optimizaron el tiempo de uso con este desarrollo, pues permitía crear sesiones usando esas licencias y era transparente para el usuario. Esta herramienta no solo benefició a los académicos y personal administrativo, sino que también destacó la importancia de contar con sistemas internos flexibles y adaptables a circunstancias imprevistas.

2. Introducción

Durante la pandemia de COVID 19 en el año 2020, pocas instituciones estaban preparadas para lo que sería trasladarse del trabajo presencial al trabajo remoto, sobre todo instituciones educativas que su principal actividad requería el uso de espacios físicos.

Aunque en el Instituto de Geología de la UNAM ya se había tenido experiencia con el uso de equipo para videoconferencias, generalmente se usaba para conectar a sedes externas y un equipo físico, grande, pesado y ubicado en un auditorio. El personal tenía experiencia en el uso de estos equipos, pero la necesidad de conectar a la comunidad era diferente, y debía ser inmediata.

Se había tenido contacto con herramientas como zoom, webex, google meet y sykpe, sin embargo, no se contaba con ninguna licencia para uso extendido. De igual manera se realizaron unas pruebas utilizando Jitsi Meet el cual es de código abierto, sin embargo, requiere infraestructura y equipo robusto. Tras evaluar las opciones que se tenían se optó por utilizar zoom, ya que era el de más fácil uso para los usuarios del Instituto, además que ofrecía un API para poder interactuar con el servicio. El único inconveniente era que su versión gratuita no era suficiente para lo que requeríamos, por lo que se optó por comprar una licencia inicial y posteriormente dos.

El uso de las licencias limitaba a que solo el usuario que tuviera las credenciales podría generar sesiones, otra opción era que una persona se encargara de crear manualmente las sesiones y repartirlas a los solicitantes, además de entrar a la sesión e iniciarla.

Dado que la opción anterior era limitada se exploraron otras opciones, y se optó por utilizar una conexión con el api de zoom para permitir, generar, compartir y administrar las sesiones desde otra plataforma, en este caso la intranet.

En este trabajo se describe el proceso y los mecanismos que se utilizaron para lograr este objetivo.

3. Condiciones experimentales

Zoom ofrece conectividad a su plataforma a través de una API (<https://api.zoom.us/v2/>) por medio de la cual se puede tener acceso a diversos servicios, particularmente y el que era de interés para este caso es el relacionado con el de “Meetings” el cual permite crear reuniones.

Para poder comunicarse con el API es necesario tener privilegios de desarrollador y crear una nueva aplicación, en una primera etapa zoom permitía utilizar un medio de autenticación por medio de un token JWT (Json Web Token):

Advanced Features		View	Edit
Zoom for developers		☐	☐
Enable view permissions for developers to contribute to app development and enable edit permission for developers to publish apps for distribution			
JWT		☐	☐
Enable users view and edit permission to contribute and publish server-to-server apps			
OAuth		☐	☐
Enable users view and edit permission to contribute and publish user-authenticated apps			
Chatbot		☐	☐
Enable users view and edit permission to contribute and publish apps that get installed in the Zoom Chat Client			
SDK		☐	☐
Enable users view and edit permission to contribute and publish hybrid apps that integrated Zoom Client functionalities			
Webhook		☐	☐
Enable users view and edit permission to contribute and publish apps that receive event-based notifications			
Zoom Apps		☐	☐
Enable users view and edit permission to contribute and publish apps that get installed in the Zoom Meeting Client			
Server-to-server OAuth app		☒	☒
Enable users view and edit permission to contribute and publish apps that receive event-based notifications			

Figura 1. Pantalla de activación de API token

Una vez que se tiene acceso al API se pueden realizar peticiones y crear reuniones. Para crear sesiones por medio del API se debe utilizar la siguiente estructura:

```
curl --request POST \
  --url https://api.zoom.us/v2/users/___USERID___/meetings \
  --header 'Authorization: YOUR_TOKEN' \
  --header 'Content-Type: application/json' \
  --data '{
    "agenda": "My Meeting",
    "default_password": false,
    "duration": 60,
    "password": "123456",
    "pre_schedule": false,
    "recurrence": {
      "end_date_time": "2022-04-02T15:59:00Z",
      "end_times": 7,
      "monthly_day": 1,
      "monthly_week": 1,
      "monthly_week_day": 1,
      "repeat_interval": 1,
      "type": 1,
      "weekly_days": "1"
    },
    "schedule_for": "jchill@example.com",
    "settings": {
```

```
"additional_data_center_regions": [  
  "TY"  
],  
"allow_multiple_devices": true,  
"alternative_hosts": "jchill@example.com;thill@example.com",  
"alternative_hosts_email_notification": true,  
"approval_type": 2,  
"approved_or_denied_countries_or_regions": {  
  "approved_list": [  
    "CX"  
  ],  
  "denied_list": [  
    "CA"  
  ],  
  "enable": true,  
  "method": "approve"  
},  
"audio": "telephony",  
"audio_conference_info": "test",  
"authentication_domains": "example.com",  
"authentication_exception": [  
  {  
    "email": "jchill@example.com",  
    "name": "Jill Chill"
```

```
}  
],  
"authentication_option": "signIn_D8cJuqWVQ623CI4Q8yQK0Q",  
"auto_recording": "cloud",  
"breakout_room": {  
  "enable": true,  
  "rooms": [  
    {  
      "name": "room1",  
      "participants": [  
        "jchill@example.com"  
      ]  
    }  
  ]  
},  
"calendar_type": 1,  
"close_registration": false,  
"cn_meeting": false,  
"contact_email": "jchill@example.com",  
"contact_name": "Jill Chill",  
"email_notification": true,  
"encryption_type": "enhanced_encryption",  
"focus_mode": true,  
"global_dial_in_countries": [
```

```
"US"

],
"host_video": true,
"in_meeting": false,
"jbh_time": 0,
"join_before_host": false,
"language_interpretation": {
  "enable": true,
  "interpreters": [
    {
      "email": "interpreter@example.com",
      "languages": "US,FR"
    }
  ]
},
"sign_language_interpretation": {
  "enable": true,
  "interpreters": [
    {
      "email": "interpreter@example.com",
      "sign_language": "American"
    }
  ]
},
```

```
"meeting_authentication": true,
"meeting_invitees": [
  {
    "email": "jchill@example.com"
  }
],
"mute_upon_entry": false,
"participant_video": false,
"private_meeting": false,
"registrants_confirmation_email": true,
"registrants_email_notification": true,
"registration_type": 1,
"show_share_button": true,
"use_pmi": false,
"waiting_room": false,
"watermark": false,
"host_save_video_order": true,
"alternative_host_update_polls": true,
"internal_meeting": false,
"continuous_meeting_chat": {
  "enable": true,
  "auto_add_invited_external_users": true
},
"participant_focused_meeting": false,
```

```
"push_change_to_calendar": false,
"resources": [
  {
    "resource_type": "whiteboard",
    "resource_id": "X4Hy02w3QUOdsKkofgb9Jg",
    "permission_level": "editor"
  }
],
"auto_start_meeting_summary": false,
"auto_start_ai_companion_questions": false,
"device_testing": false
},
"start_time": "2022-03-25T07:32:55Z",
"template_id": "Dv4YdINdTk+Z5RToadh5ug==",
"timezone": "America/Los_Angeles",
"topic": "My Meeting",
"tracking_fields": [
  {
    "field": "field1",
    "value": "value1"
  }
],
"type": 2
}'
```


Con esta opción podemos crear sesiones de zoom en una cuenta con licencia sin usar el usuario y contraseña de la cuenta.

Por otra parte, a través de la Intranet hacemos la anterior petición, garantizando que no hay aun traslape en las sesiones. Posteriormente a ejecutar la instrucción el API nos devuelve los datos de la sesión, misma que se envía por correo al usuario solicitante y se le muestra en su plataforma. El siguiente diagrama muestra la arquitectura del sistema:

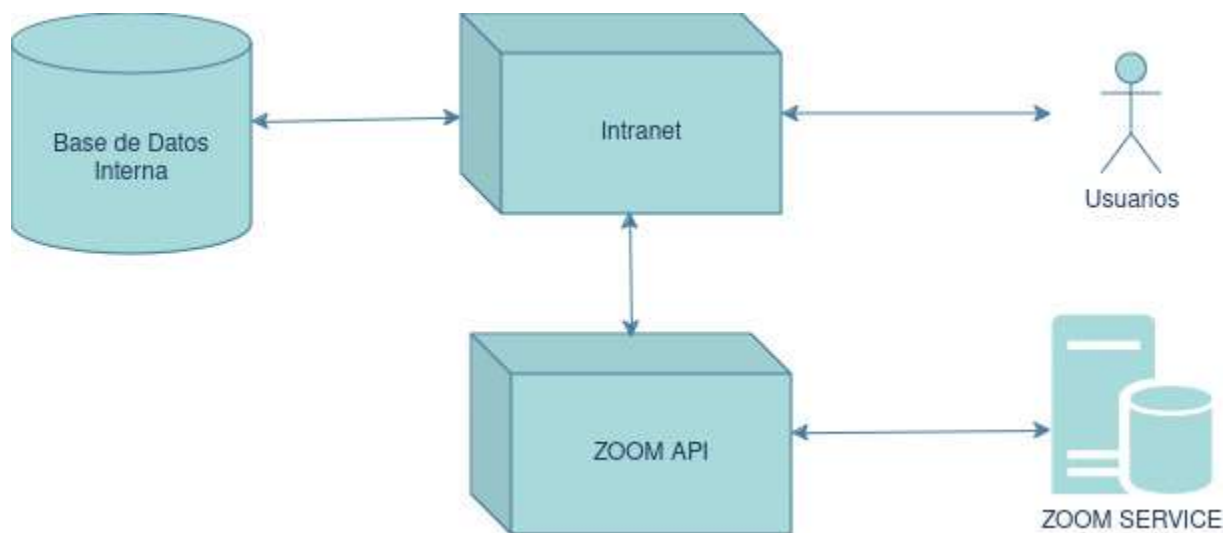


Figura 2. Arquitectura de la plataforma

En septiembre de 2023 se deprecó el uso de JWT para conectividad, por lo que se tuvo que cambiar el método de autenticación hacía el API utilizando OAuth¹.

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos tras la implementación del servicio de reuniones a través de una Intranet que se comunica con Zoom mediante su API para generar reuniones han

¹ <https://oauth.net/2/>

sido altamente positivos. El sistema permite a los usuarios crear y gestionar reuniones sin necesidad de compartir las credenciales de la cuenta principal de Zoom, lo que garantiza un mayor nivel de seguridad y confidencialidad. Esto ha optimizado el uso de la cuenta institucional, ya que los usuarios pueden programar reuniones directamente desde la plataforma sin acceso directo al usuario y contraseña, evitando posibles problemas de seguridad o mal uso de la cuenta.

En cuanto a la discusión, la integración vía API no solo ha mejorado la seguridad, sino que también ha maximizado la eficiencia en la gestión de recursos. Al centralizar el acceso a la cuenta de Zoom en la plataforma, se evita la duplicación de reuniones o el uso indebido de licencias. Además, este enfoque optimiza la asignación de tiempo y espacio de reuniones, ya que los usuarios no necesitan coordinarse fuera de la plataforma, lo que agiliza los procesos internos. Esta solución ha permitido aprovechar al máximo las funcionalidades de Zoom sin comprometer la seguridad de las credenciales, lo que ha resultado en una gestión más eficiente y segura para todos los usuarios.

5. Conclusiones

En conclusión, la integración de la plataforma con Zoom a través de su API ha demostrado ser una solución eficiente y segura para gestionar reuniones de manera centralizada. Al eliminar la necesidad de compartir las credenciales de la cuenta principal, se ha garantizado una mayor protección de los datos sensibles, reduciendo el riesgo de acceso no autorizado o mal uso. Esta implementación no solo ha optimizado la organización de reuniones, sino que ha permitido aprovechar de manera más eficiente los recursos de la cuenta institucional de Zoom. Durante la pandemia de COVID-19, esta solución fue clave para mantener el funcionamiento del Instituto, permitiendo a los equipos continuar sus actividades sin interrupciones.

Además, la capacidad de programar reuniones directamente desde la plataforma ha mejorado notablemente la productividad y coordinación entre los usuarios. Al centralizar este proceso, se ha reducido el tiempo invertido en la creación y gestión de reuniones, lo que ha facilitado el trabajo colaborativo en entornos académicos y administrativos. En resumen, la plataforma no solo ha mejorado la seguridad, sino que también ha optimizado el uso de Zoom, maximizando el rendimiento y asegurando un acceso controlado y eficiente para todos los usuarios, permitiendo al Instituto adaptarse rápidamente a las condiciones impuestas por la pandemia.

6. Bibliografía

1. Zoom Video Communications. (2020). *Zoom API Documentation*. Recuperado de <https://marketplace.zoom.us/docs/api-reference/introduction>
2. Kim, T. J., & Asbury, K. (2020). 'Like a rug had been pulled from under you': The impact of COVID-19 on teachers in England during the first six weeks of the UK lockdown. *British Journal of Educational Psychology*, 90(4), 1062-1080. <https://doi.org/10.1111/bjep.12381>
3. Johnson, N., Veletsianos, G., & Seaman, J. (2020). *U.S. Faculty and Administrators' Experiences and Approaches in the Early Weeks of the COVID-19 Pandemic*. *Online Learning Journal*, 24(2), 6-21. <https://doi.org/10.24059/olj.v24i2.2285>
4. Margetts, H. (2020). *Pandemics and the Future of Digital Government*. *Digital Government: Research and Practice*, 1(1), 1-4. <https://doi.org/10.1145/3428091>
5. Stewart, C. (2020). *Remote work and collaboration in higher education: A review of Zoom usage during COVID-19 pandemic*. *Educational Technology Research and Development*, 68, 345-350. <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09840-2>
6. Ruby on Rails Contributors. (2023). *Ruby on Rails Guides: API Development*. Recuperado de https://guides.rubyonrails.org/api_app.html

Estudio de flujos de potencia y cortocircuito para una subestación rectificadora de la línea 12 del “Trolebús” de la CDMX

Rivera, C. A.¹ Toledo, F.¹ Roldán, A.² Moreno, A.³

¹ Departamento de Energía, Unidad Azcapotzalco, Universidad Autónoma Metropolitana, C.P. 02200, Ciudad de México, México

² Ing. Eléctrica, Unidad Azcapotzalco, Universidad Autónoma Metropolitana, C.P. 02200, Ciudad de México, México

³ Dirección general de Servicio de Transportes Eléctricos, C.P. 09440, Ciudad de México, México

e-mail: rsca@azc.uam.mx

e-mail: ftoledo2@azc.uam.mx

e-mail: abi.moreno12@hotmail.com

e-mail: romr2ro@gmail.com

1. Resumen

Se detalla el proceso para la obtención del estudio de cortocircuito y del estudio de flujos de potencia para la línea 12 del “Trolebús” de la Ciudad de México. Se muestran las etapas necesarias para cada estudio, mismas que se basan en las normas y recomendaciones IEEE aplicables. Se muestra el procedimiento y los cálculos necesarios para obtener los datos iniciales, utilizando programas computacionales para la elaboración de bases de datos y simulación computacional. Para el estudio de cortocircuito se desarrollan los cuatro pasos recomendados: Paso 1, se preparan los diagramas del sistema. Paso 2 se reúnen y convierten los datos del sistema. Paso 3, se combinan las impedancias. Paso 4, se calculan las corrientes de cortocircuito. Para el estudio de flujos de potencia se determina la carga neta para cada nodo, para posteriormente obtener los flujos de potencia, regulación, pérdidas, balance reactivo y eficiencia para cada uno de los elementos que conforman la red bajo estudio.

2. Introducción

El Código de Red (versión 2) establece como requerimientos obligatorios para todos los centros de carga en Media y Alta Tensión, los aspectos de Cortocircuito, Factor de Potencia y Protecciones. De aquí la importancia de desarrollar estos estudios para redes como la del servicio metropolitano de trolebuses.

Cortocircuito. Todos los sistemas eléctricos son susceptibles a presentar fallas, en ocasiones estas son debidas a condiciones atmosféricas desfavorables, mientras que otras son debidas a alguna maniobra en el sistema, para evitar que la falla se convierta en un evento de mayor magnitud existen elementos de protección como fusibles que son los encargados de aislar la corriente de cortocircuito.

La corriente que fluye durante una falla depende de las máquinas rotatorias como motores y generadores, así como de la impedancia de los elementos que se encuentren en la red. Sin importar la condición se pueden presentar fallas de cortocircuito que en orden de importancia son ^[1]:

- Trifásica, para este tipo de falla, se obtienen los valores máximos de corriente.
- Bifásica-tierra, representa una magnitud que está comprendida entre el 87 y el 90% de la corriente trifásica.

- Bifásica, representa, en magnitud el 87% de la magnitud de la corriente de cortocircuito trifásica.
- Monofásica, es la falla más común y representa un valor similar a la magnitud de la falla trifásica para subsistemas sólidamente aterrizados, en casos excepcionales puede llegar a ser ligeramente mayor, en otros casos su valor corresponde a los valores referidos a la impedancia de puesta a tierra.

Es aquí donde el estudio de cortocircuito nos ayudará a saber cuáles son los puntos de mayor importancia al momento de considerar una falla crítica.

Flujos de potencia. Son de gran importancia en el diseño y ampliación de sistemas de potencia, ya que se busca primordialmente que todo sistema tenga continuidad de servicio y que, en caso de interrupción, esta dure lo menos posible.

Principalmente al resolver los flujos de potencia, se obtiene la magnitud y el ángulo de fase del voltaje de cada nodo, así como las potencias activa y reactiva, sin embargo, se puede obtener información acerca de la capacidad de los elementos de transformación y si esta es suficiente para el proyecto en cuestión. Al hacer un análisis de flujos de potencia, se deben de tomar en cuenta los tipos de nodo con los que se cuentan, ya que de ahí se partirá para una solución efectiva ^[2].

Existen 3 tipos de nodos o barras dentro de un sistema ^[2]:

- Nodo de carga-generación: Cualquier nodo que no sea compensador o de control de tensión.
- Nodo con control de voltaje. Nodos del sistema que tienen la capacidad de modificar su balance reactivo.
- Nodo slack: Es un nodo que compensa los parámetros de potencia activa y potencia reactiva en el sistema, normalmente corresponde a la acometida del sistema.

3. Condiciones Experimentales.

3.1. Estudio de cortocircuito

- Paso 1: Preparar los diagramas del sistema.

Los elementos del sistema eléctrico para estudios de cortocircuito, se clasifican en tres tipos:

- Activos: Tienen capacidad de movimiento interno de cargas, suministran energía al sistema y en caso de ocurrir una falla, estos serían los encargados de aportar flujo de corriente al sistema, se representan como un circuito equivalente de Thévenin.
- Pasivos: No tienen la capacidad de suministrar energía al sistema, únicamente sirven como vía de comunicación entre los elementos activos y el punto de falla.
- Inactivos: Son los elementos que no tienen una función específica en el sistema.

En el sistema bajo estudio, se cuenta con los tres tipos de elementos, sin embargo, para el estudio de cortocircuito solo se consideran los elementos activos (acometida eléctrica y motor de carga) y los elementos pasivos (alimentadores y transformadores).

- Paso 2: Reunir y convertir los datos del sistema.

Cada elemento para cada subsistema que contribuye a la falla tendrá una impedancia Z que para circuitos de corriente alterna, corresponde a un vector el cuál se puede denotar como la ecuación (1).

$$\vec{Z} = \vec{R} + j\vec{X} \quad (1)$$

Para realizar la normalización, se hace uso del sistema en por unidad, para ello se usa la potencia base elegida $S=1\text{MVA}$ y el voltaje base $V=23\text{kV}$, para obtener la impedancia base se usó la ecuación 2.

$$Z_{base} = \frac{V^2}{S} \quad (2)$$

Sustituyendo valores se obtiene lo siguiente:

$$Z_{base} = \frac{V^2}{S} = \frac{(23000)^2}{100000} = 529\Omega$$

Con la impedancia base y las ecuaciones 3, 4 y 5, (ecuación para normalizar los elementos de transformación y el elemento de rectificación respectivamente) el proceso de normalización de los elementos de la subestación se resumen en la tabla 3.1.

$$\%Z_{pu} = \frac{Z_{actual}}{Z_{base}} \left(\frac{V_{base}}{V_{actual}} \right)^2 \quad (3)$$

$$Y_{pu} = Y_{actual} + \left(\frac{Z_{actual}}{Z_{base}} \right)^2 * Y_{base} \quad (4)$$

$$Y_{pu} = Y_{actual} + \left(\frac{Z_{actual}}{Z_{base}} \right)^2 * Y_{base} \quad (5)$$

Tabla 3.1. Resumen de valores normalizados.

0	1	(2.341348E-04,4.230815E-03)	! CFE 236 MVA X/R=18.07 23 kV
1	2	(9.159683E-06,7.635860E-06)	! Cu XLPE 23kV 250 kCM 27m DNM
2	3	(4.537722E-03,3.630176E-02)	! S=2225kVA 23/.472kV Z=8.14% X/R=8
3	4	(4.828247E-03,8.860082E-03)	! Cu XLPE .472kV 750kCM 16.9m DNM
4	5	(2.120528E-02,7.844923E-02)	! RECTIFICADOR TB1 P=2MW .472/.6kVCD
1	6	(6.668354E-06,2.641293E-06)	! Cu XLPE 23kV 1/0 AWG 8.4m DNM
6	7	(2.231327E-01,8.925311E-01)	! S=25kVA 23/.22kV Z=2.3% X/R=4
7	8	(8.608816E-02,2.928353E-02)	! Cu NYY-O .22kV 1/0 AWG 10m DNM
0	8	(1.208182E+01,7.249090E+01)	! MOTOR DE CARGA 54 3.81 HP
8	9	(9.400014E-01,1.481747E-01)	! Cu NYY-O .22kV 4 AWG 43.2m DNM
9	10	(8.084519E+01,3.233808E+02)	! S=75VA .22/.127kV Z=2.5% X/R=4
10	11	(9.232892E-01,9.920834E-02)	! Cu JZ500 .127kV 6 AWG 8.9m DNM
11	12	(2.425356E+02,9.701425E+02)	! S=25VA .127/0.11kV Z=2.5% X/R=4
5	13	(2.227691E-03,4.087926E-03)	! Cu XLPE .6kVCD 750 kCM 12.6m DNM

13	14	(4.356226E-03,4.975941E-03)	! A1 XLPE .6kVCD 1000 kCM 20m DNM
13	15	(4.356226E-03,4.975941E-03)	! A1 XLPE .6kVCD 1000 kCM 20m DNM
13	16	(4.356226E-03,4.975941E-03)	! A1 XLPE .6kVCD 1000 kCM 20m DNM
13	17	(4.356226E-03,4.975941E-03)	! A1 XLPE .6kVCD 1000 kCM 20m DNM
13	18	(4.356226E-03,4.975941E-03)	! A1 XLPE .6kVCD 1000 kCM 20m DNM

- Paso 3: Combinar impedancias.

Se determinó la impedancia equivalente de Thévenin para cada uno de los nodos del sistema bajo estudio, los datos de la base de datos se ingresaron al programa computacional CC_IEEE ^[3] para obtener los resultados de la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Impedancia equivalente de Thévenin para cada punto de falla.

Nodo	Impedancia equivalente de Thévenin [Ω]

1	2.3415E-04+j4.2306E-03
2	2.4331E-04+j4.2382E-03
3	4.7810E-03+j4.0540E-02
4	9.6093E-03+j4.9400E-02
5	3.0815E-02+j1.2785E-01
6	2.4082E-04+j4.2332E-03
7	2.1975E-01+j8.8588E-01
8	3.0357E-01+j9.1468E-01
9	1.2436E+00+j1.0629E+00
10	8.2089E+01+j3.2444E+02
11	8.3012E+01+j3.2454E+02
12	3.2555E+02+j1.2947E+03
13	3.3042E-02+j1.3194E-01
14	3.7398E-02+j1.3691E-01
15	3.7398E-02+j1.3691E-01
16	3.7398E-02+j1.3691E-01
17	3.7398E-02+j1.3691E-01
18	3.7398E-02+j1.3691E-01

- Paso 4: Calcular la corriente de cortocircuito.

- Primera red

En esta red se calculó la corriente de cortocircuito para comparar la capacidad interruptiva de los fusibles en alto o bajo voltaje e interruptores en bajo voltaje. Para representar a las máquinas rotatorias de la red se utilizaron las reactancias subtransitorias X_d'' , mismas que determinan la corriente durante el primer ciclo después de ocurrida la falla [4].

- Segunda red

En esta red, se calcula la corriente de cortocircuito para determinar los esfuerzos interruptivos para interruptores en alta tensión. Debido a que el sistema bajo estudio no cuenta con ningún interruptor de potencia en alta tensión, no se calcula la segunda red.

- Tercera red

En esta red, se calcula la corriente de cortocircuito para ajustar los dispositivos relevadores con retardo de tiempo. Debido a que no se realizó el estudio de coordinación de protecciones, no se calcula la tercera red [5].

Utilizando la base de datos creada con anterioridad y usando el programa computacional CC_IEEE^[3], se usa el procedimiento para realizar los cálculos:

$$I_{CC3F 1^{a}RED} = \frac{1+j0}{Z_{TH}} \quad (6)$$

Tabla 3.3. Valores de corriente de falla (1ra. red) calculados.

NODO	Z _{th} (R, X)	(P. U.)	(kA sim)	ANG (grados)	X/R	(kA asim)	(kA cresta)	(MVA _{sim})
1	(2.3415E-04, 4.2306E-03)	236.013	5.924	-86.83	18.07	9.4936	16.0205	236.013
2	(2.4331E-04, 4.2382E-03)	235.561	5.913	-86.71	17.42	9.4765	15.9916	235.561
3	(4.7810E-03, 4.0540E-02)	24.497	29.965	-83.27	8.48	48.2763	81.4663	24.497
4	(9.6093E-03, 4.9400E-02)	19.870	24.306	-78.99	5.14	39.6178	66.8550	19.870
5	(3.0815E-02, 1.2785E-01)	7.604	7.317	-76.45	4.15	12.0423	20.3214	7.604
6	(2.4082E-04, 4.2332E-03)	235.846	5.920	-86.74	17.58	9.4877	16.0105	235.846
7	(2.1975E-01, 8.8588E-01)	1.096	2.875	-76.07	4.03	4.7398	7.9984	1.096
8	(3.0357E-01, 9.1468E-01)	1.038	2.723	-71.64	3.01	4.5906	7.7466	1.038
9	(1.2436E+00, 1.0629E+00)	.611	1.604	-40.52	.85	3.9506	6.6666	.611
10	(8.2089E+01, 3.2444E+02)	.003	.014	-75.80	3.95	.0224	.0378	.003
11	(8.3012E+01, 3.2454E+02)	.003	.014	-75.65	3.91	.0224	.0378	.003
12	(3.2555E+02, 1.2947E+03)	.001	.004	-75.89	3.98	.0065	.0109	.001
13	(3.3042E-02, 1.3194E-01)	7.352	7.075	-75.94	3.99	11.6692	19.6918	7.352
14	(3.7398E-02, 1.3691E-01)	7.046	6.780	-74.72	3.66	11.2451	18.9761	7.046
15	(3.7398E-02, 1.3691E-01)	7.046	6.780	-74.72	3.66	11.2451	18.9761	7.046
16	(3.7398E-02, 1.3691E-01)	7.046	6.780	-74.72	3.66	11.2451	18.9761	7.046
17	(3.7398E-02, 1.3691E-01)	7.046	6.780	-74.72	3.66	11.2451	18.9761	7.046
18	(3.7398E-02, 1.3691E-01)	7.046	6.780	-74.72	3.66	11.2451	18.9761	7.046

3.2. Estudio de flujos de potencia

Para calcular la rutina de flujos de potencia, se creó una base de datos utilizando los valores normalizados de los elementos del sistema y la distribución de carga para cada nodo. La base de datos fue ingresada al programa computacional Flu_gvcAIFA ^[6] para el cálculo de flujos de potencia, los resultados se resumen a continuación:

Tabla 3.4. Flujos de potencia del sistema.

>>> FLUJOS DE POTENCIA EN ELEMENTOS

VALORES EN MW Y MVAR

elemento:	2	DE BUS	1 A BUS	2 =	2.03431 (MW) + j	.38545 (MVAR)
		DE BUS	2 A BUS	1 =	-2.03427 (MW) + j	-.38541 (MVAR)
		PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =			.00004 (MW) + j	.00003 (MVAR)
elemento:	3	DE BUS	2 A BUS	3 =	2.03399 (MW) + j	.38346 (MVAR)
		DE BUS	3 A BUS	2 =	-2.01455 (MW) + j	-.22793 (MVAR)
		PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =			.01944 (MW) + j	.15553 (MVAR)
elemento:	4	DE BUS	3 A BUS	4 =	2.01456 (MW) + j	.22793 (MVAR)
		DE BUS	4 A BUS	3 =	-1.99387 (MW) + j	-.18997 (MVAR)
		PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =			.02069 (MW) + j	.03796 (MVAR)
elemento:	5	DE BUS	4 A BUS	5 =	1.99387 (MW) + j	.18997 (MVAR)
		DE BUS	5 A BUS	4 =	-1.94845 (MW) + j	-.02192 (MVAR)
		PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =			.04542 (MW) + j	.16805 (MVAR)
elemento:	6	DE BUS	1 A BUS	6 =	.01506 (MW) + j	.00712 (MVAR)
		DE BUS	6 A BUS	1 =	-.01506 (MW) + j	-.00712 (MVAR)
		PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =			.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
elemento:	7	DE BUS	6 A BUS	7 =	.01684 (MW) + j	.00843 (MVAR)
		DE BUS	7 A BUS	6 =	-.01676 (MW) + j	-.00811 (MVAR)
		PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =			.00008 (MW) + j	.00032 (MVAR)
elemento:	8	DE BUS	7 A BUS	8 =	.01676 (MW) + j	.00811 (MVAR)
		DE BUS	8 A BUS	7 =	-.01673 (MW) + j	-.00810 (MVAR)
		PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =			.00003 (MW) + j	.00001 (MVAR)

elemento: 10	DE BUS 8 A BUS 9 =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	DE BUS 9 A BUS 8 =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
elemento: 11	DE BUS 9 A BUS 10 =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	DE BUS 10 A BUS 9 =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
elemento: 12	DE BUS 10 A BUS 11 =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	DE BUS 11 A BUS 10 =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
elemento: 13	DE BUS 11 A BUS 12 =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	DE BUS 12 A BUS 11 =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
elemento: 14	DE BUS 5 A BUS 13 =	1.94845 (MW) + j	.02191 (MVAR)
	DE BUS 13 A BUS 5 =	-1.93890 (MW) + j	-.00440 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00954 (MW) + j	.01751 (MVAR)
elemento: 15	DE BUS 13 A BUS 14 =	.43092 (MW) + j	.00105 (MVAR)
	DE BUS 14 A BUS 13 =	-.43000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00092 (MW) + j	.00105 (MVAR)
elemento: 16	DE BUS 13 A BUS 15 =	.43092 (MW) + j	.00105 (MVAR)
	DE BUS 15 A BUS 13 =	-.43000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00092 (MW) + j	.00105 (MVAR)
elemento: 17	DE BUS 13 A BUS 16 =	.43092 (MW) + j	.00105 (MVAR)
	DE BUS 16 A BUS 13 =	-.43000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00092 (MW) + j	.00105 (MVAR)
elemento: 18	DE BUS 13 A BUS 17 =	.43092 (MW) + j	.00105 (MVAR)
	DE BUS 17 A BUS 13 =	-.43000 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00092 (MW) + j	.00105 (MVAR)
elemento: 19	DE BUS 13 A BUS 18 =	.21523 (MW) + j	.00026 (MVAR)
	DE BUS 18 A BUS 13 =	-.21500 (MW) + j	.00000 (MVAR)
	PÉRDIDAS Y BAL. REACT. =	.00023 (MW) + j	.00026 (MVAR)

4. Resultados Y Discusión.

- Para el estudio de cortocircuito, se puede observar que los interruptores y fusibles de la subestación, poseen la capacidad interruptiva suficiente para en caso de alguna falla en el sistema, estos puedan actuar de manera segura, oportuna y eficiente.
- Los flujos de potencia que circulan a través de los nodos restantes no sobrepasan la capacidad de los elementos del sistema bajo estudio manteniendo así la confiabilidad del sistema en todo momento.

5. Conclusiones

- En lo referente a las capacidades interruptivas se muestra la tabla 3.3 en la cual se especifican los valores de capacidad interruptiva de los equipos existentes y los valores máximos de falla. Como se puede observar, ninguna de las capacidades interruptivas es rebasada, por lo cual los elementos del esquema de protección contra sobrecorriente se consideran adecuados.
- Se puede observar que los nodos de corriente continua no tienen demanda de reactivos, por lo tanto, la relación tensión corriente mejora en comparación con los nodos de corriente alterna que, debido a los alimentadores, los procesos de transformación y las cargas que alimentan tienen una demanda de reactivos.
- Los parámetros de balance reactivo (factor de potencia) y regulación de voltaje están dentro de los parámetros normativos admisibles, por lo que el sistema cumple con los requerimientos de cortocircuito, factor de potencia y protecciones.

6. Bibliografía.

1. IEEE, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (IEEE Red Book)*, IEEE Std 141™-1993 (R1999).
2. IEEE, *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (IEEE Brown Book)*, IEEE Std 399™-1990.
3. F. Toledo Toledo, CC_IEEE.exe, versión 10.0, Ciudad de México, México, 2021. [Offline].
4. F. Toledo Toledo, *Métodos computacionales para el análisis de sistemas de potencia*. Ciudad de México, México: Instituto Politécnico Nacional, 1998.
5. IEEE, *IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Violet Book)*, IEEE Std 551™-2006.
6. F. Toledo Toledo, Flu_gvcAIFA.exe, versión 12.0, Ciudad de México, México, 2023. [Offline].
7. Arturo A. Roldan Moreno, Estudio de flujos de potencia y cortocircuito para una subestación rectificadora de la línea 12 del "Trolebús" de la CDMX, Ciudad de México, México, 2024.

Estudio de cortocircuito para una subestación del Sistema de Transporte Eléctrico “Cablebús” en cumplimiento del Código de red 2.0

Rivera, C. A.¹ Toledo, F.¹ Arias, N.² Díaz, C.³

¹ Departamento de Energía, Unidad Azcapotzalco, Universidad Autónoma Metropolitana, C.P. 02200, Ciudad de México, México

² Ing. Eléctrica, Unidad Azcapotzalco, Universidad Autónoma Metropolitana, C.P. 02200, Ciudad de México, México

³ Dirección General de Servicio de Transportes Eléctricos, C.P. 09440, Ciudad de México, México

e-mail: rsca@azc.uam.mx

e-mail: ftoledo2@azc.uam.mx

e-mail: neftiaras@gmail.com

e-mail: c.diaz.c@meledmx.com; electrico.diaz78@gmail.com

1. Resumen

Se muestra el estudio de Cortocircuito realizado a una de las subestaciones del Servicio de Transportes Eléctricos (STE) “Cablebús” para poder cumplir con lo establecido en el Código de red 2.0, el estudio muestra las corrientes de cortocircuito para primera, segunda y tercera red, para lo cual se utilizó un programa computacional que da solución a este estudio empleando el método de las componentes simétricas.

Este artículo se centra en la investigación y análisis de tres aspectos fundamentales en el ámbito de la ingeniería eléctrica: El estudio de cortocircuito, el Código de red 2.0 y el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

Se realizó el estudio de Cortocircuito, explorando las implicaciones y consecuencias de este fenómeno en SEP. Se examinaron las metodologías de cálculo y las herramientas utilizadas para evaluar la capacidad de los equipos y la seguridad del SEP frente a Cortocircuitos.

2. Introducción

El Código de Red 2.0 establece como requerimientos obligatorios para todos los centros de carga en Media y Alta Tensión, el aspecto de Cortocircuito. De aquí la importancia de desarrollar estos estudios para redes como la del servicio cablebús en la ciudad.

Cortocircuito. Todos los sistemas eléctricos son susceptibles a presentar fallas, en ocasiones estas son debidas a condiciones atmosféricas, mientras que otras son debidas a alguna maniobra en el sistema, para evitar que la falla se convierta en un evento de mayor magnitud existen elementos de protección como fusibles que son los encargados de aislar la corriente de cortocircuito.

La corriente que fluye durante una falla depende de las máquinas rotatorias como motores y generadores, así como de la impedancia de los elementos que se encuentren en la red. Sin importar la condición se pueden presentar fallas de cortocircuito que en orden de importancia son ^[1]:

- Trifásica, para este tipo de falla, se obtienen los valores máximos de corriente.
- Bifásica-tierra, representa una magnitud que está comprendida entre el 87 y el 90% de la corriente trifásica.
- Bifásica, representa, en magnitud el 87% de la magnitud de la corriente de cortocircuito trifásica.
- Monofásica, es la falla más común y representa un valor similar a la magnitud de la falla trifásica para subsistemas sólidamente aterrizados, en casos excepcionales puede llegar a ser ligeramente mayor, en otros casos su valor corresponde a los valores referidos a la impedancia de puesta a tierra.

Es aquí donde el estudio de cortocircuito nos ayudará a saber cuáles son los puntos de mayor importancia al momento de considerar una falla crítica.

Los estándares de industrialización han establecido tres nombres específicos para los valores de reactancia en las corrientes de falla, las cuales son las siguientes:

- 1) Reactancia subtransitoria, (x''): Determina la corriente durante el primer ciclo después de ocurrida la falla en tiempos que oscilan los 0.1 segundos.
- 2) Reactancia transitoria, (x'): Se asume para determinar la corriente después de varios ciclos a una frecuencia de 60 Hz. De 0.5 a 2 segundos, la reactancia incrementa

- 3) Reactancia síncrona, (x): Este valor determina el flujo de corriente después de que la condición de estado estable se ha alcanzado.

En su mayoría los sistemas que protegen a los dispositivos, tales como fusibles o interruptores, operan antes de que se alcancen condiciones estables, por lo cual la reactancia síncrona raramente es utilizada en el cálculo de corriente de falla para la selección de ajustes de dispositivos^[2].

3. Condiciones Experimentales.

- Paso 1: Preparar los diagramas del sistema.

Los elementos del sistema eléctrico para estudios de cortocircuito se clasifican en tres tipos:

- Activos: Tienen capacidad de movimiento interno de cargas, suministran energía al sistema y en caso de ocurrir una falla, estos serían los encargados de aportar flujo de corriente al sistema, se representan como un circuito equivalente de Thévenin.
- Pasivos: No tienen la capacidad de suministrar energía al sistema, únicamente sirven como vía de comunicación entre los elementos activos y el punto de falla.
- Inactivos: Son los elementos que no tienen una función específica en el sistema.

En el sistema bajo estudio, se cuenta con los tres tipos de elementos, sin embargo, para el estudio de cortocircuito solo se consideran los elementos activos (acometida eléctrica y motor de carga) y los elementos pasivos (alimentadores y transformadores).

- Paso 2: Reunir y convertir los datos del sistema.

Cada elemento para cada subsistema que contribuye a la falla tendrá una impedancia Z que para circuitos de corriente alterna, corresponde a un vector el cuál se puede denotar como la ecuación (1).

$$Z = R + jX \quad (1)$$

Para realizar la normalización, se hace uso del sistema en por unidad, para ello se usa la potencia base elegida $S=1\text{MVA}$ y el voltaje base $V=23\text{kV}$, para obtener la impedancia base se usó la ecuación 2 y sustituyendo valores:

$$Z_B = \frac{V^2}{S_B} = \frac{(23\text{kV})^2}{1\text{MVA}} = 529\Omega \quad (2)$$

Con la impedancia base y las ecuaciones 3, 4 y 5, (ecuación para normalizar los elementos de transformación y el elemento de rectificación respectivamente) el proceso de normalización de los elementos de la subestación se resume en la tabla 3.1.

$$\%Z \angle \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \left(\frac{S_B}{S}\right) \quad (3)$$

$$X_\gamma = X_t + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 * X_S \quad (4)$$

$$R_\gamma = R_t + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 * R_S \quad (5)$$

En la Figura 1 se muestra el diagrama unifilar general de la estación bajo estudio.

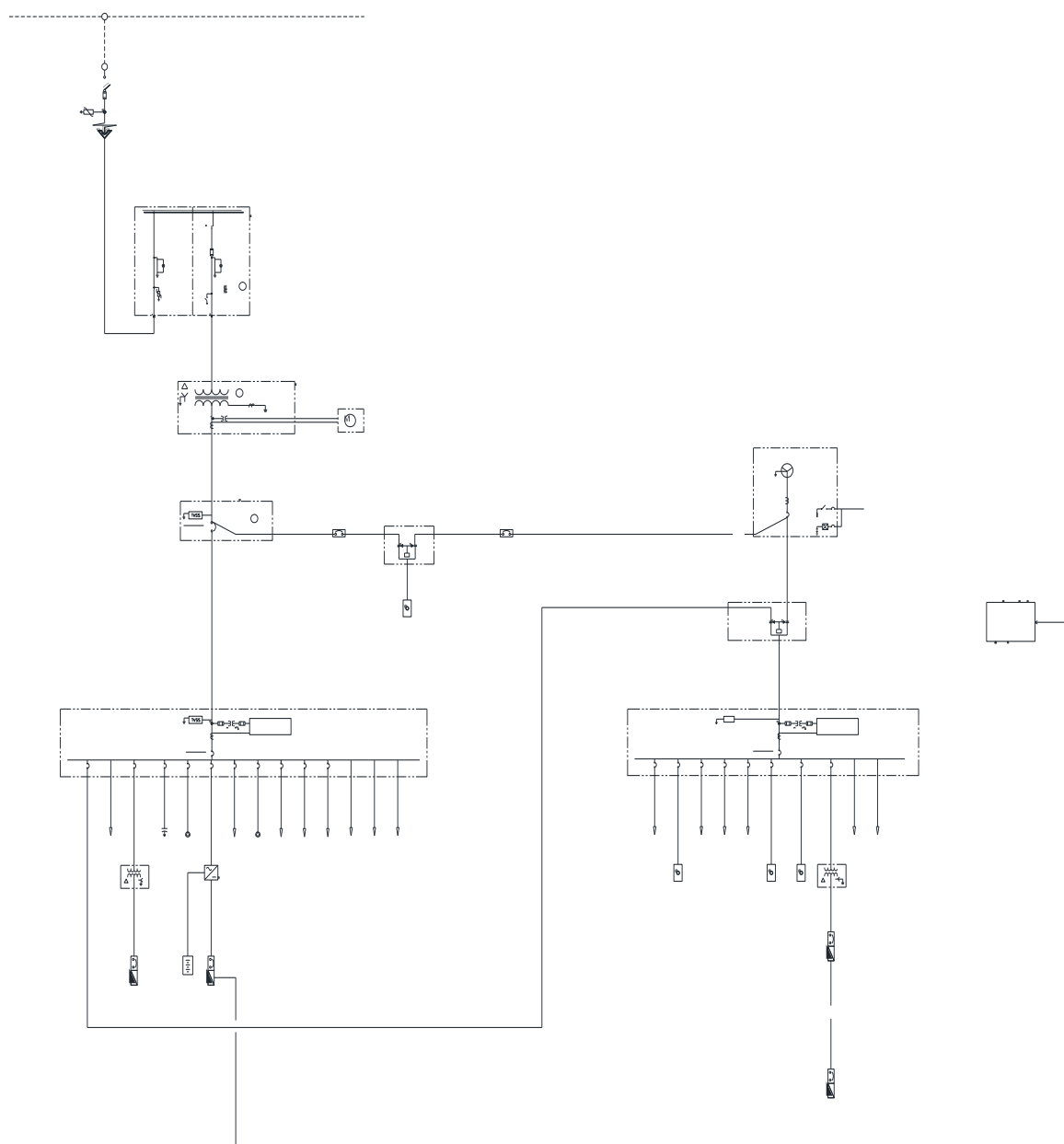


Figura 1 Diagrama unifilar general de la estación.

Tabla 3.1. Resumen de valores normalizados.

0	1	(4.528087E-03,1.039441E-02)	! CFE 88.2MVA
23kV X/R=2.29554			
1	2	(2.604826E-05,5.581770E-06)	! ACSR, 1/0,
20m			
2	3	(5.860858E-05,1.255898E-05)	! Al, XLP,
45m , DNM			
3	4	(5.209651E-06,1.389241E-06)	! Al,XLP, 4m
,DM			
4	5	(1.086559E-01,4.346238E-01)	! TR 150kVA
23/0.48kV AA DY z=6.72% X/R=4			
5	6	(7.074312E-03,9.560573E-03)	! Cu 500kCM
THW 18m DNM			
6	7	(3.144138E-03,4.249144E-03)	! Cu 500kCM
THW 8m DNM			
5	8	(3.930173E-03,5.311430E-03)	! Cu 500kCM
THW 10m DNm			
7	9	(6.162967E-03,4.511155E-03)	! Cu 127 mm2
THW 8m DNM			
9	10	(1.309630E-02,9.586205E-03)	! Cu 250kCM
TWH 17m DNM			
10	11	(5.485155E-02,8.646381E-03)	! Cu 4 AWG
THW 12m DNM			
11	12	(2.155872E-01,8.623489E-01)	! TR 45kVa
0.48/0.22kV D-Y AA z=4.3			
7	13	(6.596929E-01,4.904992E-02)	! Cu 8.37mm2
THW 12m DNM			
13	14	(3.233808E-01,1.293523E+00)	! TR 30kVA
0.48/0.22kV D-Y AA z=4			

- Paso 3: Combinar impedancias.

Se determinó la impedancia equivalente de Thévenin para cada uno de los nodos del sistema bajo estudio, los datos de la base de datos se ingresaron al programa computacional CC_IEEE ^[3] para obtener los resultados de la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Impedancia equivalente de Thévenin para cada punto de falla.

Nodo	Impedancia equivalente de Thévenin [Ω]
1	(4.5281E-03, 1.0394E-02)
2	(4.5541E-03, 1.0400E-02)
3	(4.6127E-03, 1.0413E-02)
4	(4.6180E-03, 1.0414E-02)
5	(1.1327E-01, 4.4504E-01)
6	(1.2035E-01, 4.5460E-01)
7	(1.2349E-01, 4.5885E-01)
8	(1.1720E-01, 4.5035E-01)
9	(1.2966E-01, 4.6336E-01)
10	(1.4275E-01, 4.7294E-01)
11	(1.9760E-01, 4.8159E-01)
12	(4.1319E-01, 1.3439E+00)
13	(7.8319E-01, 5.0790E-01)
14	(1.1066E+00, 1.8014E+00)

- Paso 4: Calcular la corriente de cortocircuito.

- Primera red

En esta red se calculó la corriente de cortocircuito para comparar la capacidad interruptiva de los fusibles en alto o bajo voltaje e interruptores en bajo voltaje. Para representar a las máquinas rotatorias de la red se utilizaron las reactancias subtransitorias X_d'' , mismas que determinan la corriente durante el primer ciclo después de ocurrida la falla ^[4].

- Segunda red

En esta red, se calcula la corriente de cortocircuito para determinar los esfuerzos interruptivos para interruptores en alta tensión.

- Tercera red

En esta red, se calcula la corriente de cortocircuito para ajustar los dispositivos relevadores con retardo de tiempo.

Utilizando la base de datos creada con anterioridad y usando el programa computacional CC_IEEE^[3], se usa el procedimiento para realizar los cálculos:

$$I_{CC3F 1^a RED} = \frac{1+j0}{Z_{TH}} \quad (6)$$

Tabla 3.3. Valores de corriente de falla (1ra. red) calculados.

NODO	Z _{th} (R,X)		(P.U.)	(kA sim)	ANG(grados)
X/R	(kA asim)	(kA cresta)	(MVAsim)		

1	(4.5281E-03, 1.0394E-02)	88.200	2.214	-66.46
2.30	3.8640	6.5204	88.200	
2	(4.5541E-03, 1.0400E-02)	88.079	2.211	-66.35
2.28	3.8619	6.5169	88.079	
3	(4.6127E-03, 1.0413E-02)	87.808	2.204	-66.11
2.26	3.8572	6.5091	87.808	
4	(4.6180E-03, 1.0414E-02)	87.782	2.204	-66.09
2.26	3.8567	6.5082	87.782	
5	(1.1327E-01, 4.4504E-01)	2.178	2.619	-75.72
3.93	4.3244	7.2973	2.178	
6	(1.2035E-01, 4.5460E-01)	2.126	2.558	-75.17
3.78	4.2334	7.1439	2.126	
7	(1.2349E-01, 4.5885E-01)	2.104	2.531	-74.94
3.72	4.1942	7.0777	2.104	
8	(1.1720E-01, 4.5035E-01)	2.149	2.585	-75.41
3.84	4.2734	7.2113	2.149	
9	(1.2966E-01, 4.6336E-01)	2.078	2.500	-74.37
3.57	4.1534	7.0088	2.078	
10	(1.4275E-01, 4.7294E-01)	2.024	2.435	-73.20
3.31	4.0692	6.8668	2.024	
11	(1.9760E-01, 4.8159E-01)	1.921	2.311	-67.69
2.44	3.9961	6.7435	1.921	
12	(4.1319E-01, 1.3439E+00)	.711	1.866	-72.91
3.25	3.1243	5.2723	.711	
13	(7.8319E-01, 5.0790E-01)	1.071	1.289	-32.96
.65	3.7892	6.3942	1.071	
14	(1.1066E+00, 1.8014E+00)	.473	1.241	-58.44
1.63	2.3309	3.9334	.473	

Tabla 3.4. Valores de corriente de falla (2da red) calculados.

NODO	VEL. DE INT. (CICLOS)	(kAMP sim)	(kAMP asim)
		Sc_c (MVA)	
1	3	2.4150	2.4150
		96.2056	
2	3	2.4137	2.4137
		96.1539	
3	3	2.4108	2.4108
		96.0379	
4	3	2.4104	2.4104
		96.0251	

Tabla 3.5. Valores de corriente de falla (3ra red) calculados.

NODO	(POR UNIDAD)	(kAMP)	Sc_c (MVA)
1	96.2056	2.4150	96.2056
2	96.1539	2.4137	96.1539
3	96.0379	2.4108	96.0379
4	96.0251	2.4104	96.0251
5	2.2470	2.7027	2.2470
6	2.1997	2.6459	2.1997
7	2.1794	2.6214	2.1794
8	2.2205	2.6708	2.2205

9	2.1582	2.5959	2.1582
10	2.1144	2.5432	2.1144
11	2.0764	2.4976	2.0764
12	.7441	1.9527	.7441
13	1.9689	2.3682	1.9689
14	.5551	1.4568	.5551

4. Resultados y Discusión.

- Se puede observar que los interruptores y fusibles de la subestación, poseen la capacidad interruptiva suficiente para en caso de alguna falla en el sistema, estos puedan actuar de manera segura, oportuna y eficiente.

5. Conclusiones

- En lo referente a las capacidades interruptivas se muestra la tabla 3.3, 3.4 y 3.5 en las cuales se especifican los valores de capacidad interruptiva de los equipos existentes y los valores máximos de falla. Como se puede observar, ninguna de las capacidades interruptivas es rebasada, por lo cual los elementos del esquema de protección contra sobrecorriente se consideran adecuados.

6. Bibliografía.

1. IEEE, *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (IEEE Red Book)*, IEEE Std 141™-1993 (R1999).
2. IEEE, *IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Violet Book)*, IEEE Std 551™-2006.
3. Neftalí Arias Escamilla, Estudio de cortocircuito para una subestación del Sistema de Transporte Eléctrico “Cablebús” en cumplimiento del Código de red 2.0, Ciudad de México, México, 2023.

Obtención de biocombustibles líquidos a partir de mezclas de biocrudos usando Ni-Pd en arcillas pilareadas con circonio

Zamora-Rodea, E. G.^{1,2}, Vazquez Flores, A. J.¹, De los Reyes Heredia, J. A.³, Rosas Cedillo R.³,
Ángeles Beltrán, D.¹, García Martínez, D. A.¹, González Hernández, N.¹, Tapia Medina, C. R.¹,
Medina Mendoza A.K., Gutiérrez Limón M. A.¹, Colín Luna, J. A.¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 420, C.P. 02128,
Azcapotzalco, CDMX, MX

²Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa, Vasco de Quiroga No. 4871, C.P. 05348,
Cuajimalpa de Morelos, CDMX, MX

³Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco No. 186, C.P. 09340,
Iztapalapa, CDMX, MX

egregorio@cua.uam.mx; al2193043437@azc.uam.mx; jahr@xanum.uam.mx; dab@azc.uam.mx;
apj@azc.uam.mx; crtm@azc.uam.mx; jacl@azc.uam.mx

1. Resumen

En el presente trabajo se estudió el hidrotratamiento de la mezcla bioaceite/aceite vegetal a diferentes relaciones másicas empleando catalizadores bifuncionales mono y bimetálico Pd y NiPd/PILC-Zr a condiciones medias de reacción, 573 K y 3 MPa de H₂ para obtener un bioturbosina. Se encontró que la ruta de hidrodeshidrogenación (HDO) del ácido oleico se favoreció en comparación a su tratamiento individual, obteniendo octadecano, propilciclohexano principales componentes de diésel verde y bioturbosina, respectivamente.

2. Introducción

Actualmente, el uso de combustibles de origen fósil ha incrementado los índices de gases de efecto invernadero (CO₂, CO, NO_x, etc), y ha generado problemas al medio ambiente, así como a la salud de los seres vivos. Por lo cual se buscan nuevas fuentes de energía que sean limpias y renovables. Una de las fuentes consideradas limpias es la que se obtiene a partir de la biomasa. La biomasa es todo aquel material orgánico proveniente de plantas y animales, virgen o residual, la cual puede ser aprovechada no sólo para la obtención de biocombustibles sino también para productos de alto valor agregado [1-3]. Además, la biomasa se puede considerar renovable debido a que el CO₂ que se produce con la quema de los biocombustibles es absorbido por las plantas para su crecimiento por medio de la fotosíntesis [1]. La biomasa de segunda generación [3] es una fuente prometedora para la obtención de bioenergéticos como una fuente sostenible. En particular, la biomasa lignocelulósica, los aceites vegetales y grasas animales residuales son de mayor interés [3]. La biomasa lignocelulósica está integrada por celulosa, hemicelulosa y lignina [3-4]. Dada la complejidad de la biomasa lignocelulósica es necesario una etapa de pretratamiento para su uso como biocombustible. Este pretratamiento involucra de un proceso térmico en ausencia de aire denominado pirólisis [5] donde se pueden obtener biocrudo o bioaceite. Dicho bioaceite es una mezcla de compuestos aromáticos oxigenados, furanos, ácidos carboxílicos, etc., mientras que los aceites vegetales y grasas animales están compuestos por triglicéridos y ácidos grasos libres. Estos biocrudos presentan un alto contenido de oxígeno lo que dificulta su aplicación directa en motores de transporte terrestre y de aviación debido a propiedades indeseables como alta viscosidad, inestabilidad térmica y corrosión. Por lo cual son sometidos a una etapa de mejora a través de reacciones de hidrotratamiento (HDT). El HDT consiste en poner en contacto a los biocrudos, de manera individual

o en mezcla, con H_2 y un catalizador heterogéneo bifuncional con la finalidad de remover el oxígeno proceso conocido dentro del HDT como hidrodeoxigenación (HDO) [2-7].

Diferentes grupos de investigación [5-6], han realizado el estudio de la mezcla de un bioaceite y aceite vegetal con la finalidad de incrementar la relación H/C con respecto a la relación O/C, obteniendo así, biocombustibles dentro del rango de turbosina y diésel verde. Roy et. al. [6] menciona que a través de la HDT de mezclas de biocrudos se reduce la reactividad de algunos bioaceites y las reacciones de polimerización las cuales conducen a una pronta desactivación del catalizador en consecuencia mejorando la solubilidad de hidrógeno en el medio de reacción.

Para llevar a cabo estas reacciones, se emplean catalizadores heterogéneos bifuncionales debido a que presentan dos tipos de sitios: sitios metálicos, los cuales se encargan de la activación de H_2 y los sitios ácidos localizados en el soporte por un metal oxofílico, para activar al oxígeno [4,7]. En este sentido, se ha reportado [1-3] una alta actividad de catalizadores mono o bimetálicos de metales nobles Pd y Pt con Ni soportados en óxidos de metales oxofílicos (Ti, Al, Zr, etc.) o soportes con acidez superficial como las zeolitas, arcillas pilareadas y sílices mesoporosas modificadas, los cuales favorecen la ruptura de enlaces C-C y C-O [3-6]. Por lo cual, en el presente trabajo, se estudió el hidrotratamiento de la mezcla eugenol/ácido oleico (EUG/AO) a diferentes relaciones másicas empleando catalizadores bifuncionales mono y bimetálicos de Pd y Ni-Pd /Zr-PILC a condiciones medias de reacción, 573 K y 3 MPa de H_2 .

3. Condiciones experimentales

3.1 Síntesis del soporte PILC-Zr y de los catalizadores Pd y Ni-Pd sobre PILC-Zr

La síntesis del soporte PILC-Zr se realizó de acuerdo con los procedimientos reportados por Colin-Luna et al. [2]. Inicialmente 10 g de montmorillonita sódica (Sigma- Aldrich) fueron mezclados con una solución agua-acetona (50:50) con el propósito de expandir las láminas de la arcilla. A su vez se preparó una solución de cloruro de circonilo (Sigma- Aldrich) 0.1 M a temperatura ambiente, dicha solución se dejó madurar durante 7 días previo a la etapa de intercalación del catión (pilareo). Posteriormente, la solución rica en circonio fue adicionada a la suspensión de arcilla por goteo lento y agitación vigorosa a 313 K durante 4 h. Finalmente, la arcilla se filtró y se lavó con agua desionizada hasta la eliminación total de cloruros, se dejó secar a temperatura ambiente por 24 h y se calcinó a 823 K mediante calentamiento lento. La incorporación de la fase metálica se realizó empleando el método de impregnación en estado sólido [5], el cual consistió en agregar al soporte, acetilacetato de Pd o Ni (Sigma Aldrich) a una relación en peso 1:1 mediante molienda mecánica hasta homogenización de la mezcla. Finalmente, el precursor de catalizador fue calcinado a 773 K. Previo a la evaluación catalítica, los catalizadores en su fase óxido fueron activados en una corriente de H_2 a una temperatura de 623 K por 1 h con una rampa de calentamiento de 10 K/min y un flujo de 4 L/h [2,4,7].

3.2 Caracterización del soporte PILC-Zr y de los catalizadores Pd y Ni-Pd

El soporte y el catalizador Ni-Pd/PILC-Zr fueron caracterizados por diferentes técnicas de análisis: DRX y fisisorción de N₂. La estructura laminar de la bentonita original, PILC-Zr y el catalizador Ni-Pd se determinaron mediante DRX empleando un equipo Brucker acoplado a un tubo de rayos X de radiación de CuK α ($\lambda = 1.5406$ nm) en el dominio del ángulo 2θ de 2 a 80°, velocidad de escaneo de 2 °/s operando a 35 kV y 20 mA. A partir de las reflexiones basales de los metales se estimó el tamaño de las partículas metálicas a través de la ecuación de Scherrer (ecn. 1)

$$D_{hkl} = \frac{K\lambda}{\Delta(2\theta)\cos\theta} \quad (\text{ecn. 1})$$

Donde D_{hkl} es el tamaño del cristal, hkl son los índices de Miller de los planos que se estudian, K es un factor numérico en dependencia del factor de forma del cristal, λ es la longitud de onda de la fuente de emisión de rayos X, $\Delta(2\theta)$ es la anchura a media altura del pico de difracción de rayos X y θ es el ángulo de Bragg de la reflexión evaluada [8].

Para la determinación de las propiedades texturales tales como el área superficial (S_{BET}), diámetro (D_p) y volumen de poro (V_p) de los distintos materiales, se empleó un equipo Micromeritics 2100E en un sistema volumétrico estático usando N₂ como adsorbato a 75.5 K. Las muestras fueron previamente desgasificadas a 470 K por 24 h bajo alto vacío. La caracterización morfológica y el análisis químico elemental del soporte y los catalizadores se realizó a través de microscopía electrónica de barrido (MEB) empleando un equipo ZEISS modelo SUPRA 55VP acoplado a un analizador de rayos X de dispersión de energía (MEB-EDS) operado a 200 KV y amplificaciones entre 10000X y 20000X, empleando la técnica de electrones retrodispersos. El análisis MEB-EDS se realizó mediante un detector de estado sólido tipo SDD (Silicon Drift Detector). La dispersión, el área metálica y el tamaño promedio de partícula de determinó a través de quimisorción de H₂.

3.3 Evaluación catalítica

La evaluación catalítica se realizó en el hidrotratamiento de una mezcla EUG/AO en un reactor por lotes de alta presión (Parr Instruments) equipado con agitador de propela y mantilla de calentamiento. Las relaciones en peso empleadas para las mezclas EUG/AO fueron: 20/80, 50/50 y 80/20. En un ensayo típico (50/50 EUG-AO) el reactor fue cargado y cerrado herméticamente empleando 50 mL de n-dodecano (Sigma Aldrich), 1.25 g de eugenol, 1.25 g de ácido oleico y 0.25 g de catalizador. La reacción se llevó a cabo a una temperatura de 573 K, presión de 3 MPa de H₂ y una agitación de 1500 rpm durante 6 h [2-5]. Finalmente, los productos de reacción en fase líquida fueron analizados por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC/MS) [4-6].

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización del soporte y del catalizador Ni-Pd/PILC-Zr

En la Figura 1, se presentan los patrones de DRX de la montmorillonita original, del soporte PILC-Zr, y del catalizador con un contenido de Pd del 1 % peso, así como del catalizador bimetalico Ni-Pd sobre PILC-Zr. En la Figura 1A), se exhibe se puede apreciar el pico principal correspondiente a la reflexión basal d(001) a un ángulo de difracción de 7.5° en 2θ, así como los picos de montmornillonita (Mt), cristobalita (C) y cuarzo (Q), a ángulos de difracción de 19.6, 22 y 26.7° en 2θ, respectivamente. Para la PILC-Zr, se puede notar que el pico correspondiente al plano d(001) presentó un corrimiento hacia la izquierda a un ángulo de 5.1° en 2θ lo que indicaría la intercalación del catión y la fijación de los pilares de ZrO₂. En consecuencia, de acuerdo la Ley de Bragg [2] se encontró un incremento en el espaciamiento interlaminar de 1.3 a 1.9 nm, conservando el arreglo laminar de la arcilla. Para el caso del catalizador, se detectaron reflexiones basales a 37.23 y 43.58° en 2θ los cuales corresponden a los planos cristalinos (111) y (200) de la fase cubica centrada en la cara (fcc) del Ni (JCPDS: 04-0835) mientras que para el Pd se encontraron reflexiones basales en los ángulos 40.5 y 46.4° correspondientes a los planos (111) y (200) de la estructura fcc del Pd (JCPDS No. 46-1043) para ambos casos se puede advertir que no se ve afectado el arreglo laminar de la arcilla. En la Tabla 1, se encuentran las distancias interlaminares del soporte y de los catalizadores sintetizados, se puede observar que para el monometálico de Pd y bimetalico Ni-Pd no presentaron un cambio significativo en el espacio interlaminar. Así mismo, en dicha Tabla, se muestra el tamaño de partícula de Ni y del Pd los cuales de acuerdo con la ecuación de Scherrer fueron de 30 nm y 14 nm, respectivamente.

Tabla 1. Propiedades texturales y estructurales de bentonita, soporte PILC-Zr y bimetalico sobre Zr-PILC

Soporte/Catalizador	S _{BET}	V _P	d _P	2θ _d	d	Ni ^f	Pd ^f	TPP ^g
						(nm)	(nm)	(nm)
	[m ² /g] ^a	[cm ³ /g] ^b	[nm] ^c	[°]	[nm] ^e			
Montmorillonita	10	0.09	0.97	7.45	1.32	-	-	-
PILC-Zr	211	0.19	3.87	5.14	1.91	-	-	-
Ni/PILC-Zr	159	0.12	3.87	5.23	1.88	31	-	33
Pd/PILC-Zr	174	0.13	3.89	5.06	1.94	-	10	10
NiPd/PILC-Zr	182	0.13	3.88	5.06	1.94	30	10<	36

^aS_{BET}: área superficial BET; ^bV_P: Volumen de poro; ^cd_P: diámetro poro; ^dángulo de reflexión del plano d(001); ^eespacio interlaminar calculado empleando la ley de Bragg; ^fcalculado a través de la ecuación de Scherer, ^gtamaño de partícula determinado mediante SEM-EDS.

En la Figura 1B), se encuentran las isotermas de adsorción-desorción de la montmorillonita, del soporte PILC-Zr y de los catalizadores Pd y Ni-Pd. De acuerdo con la IUPAC, el tipo de lazo histéresis que se presenta en la PILC-Zr, Figura 1B, pertenece al tipo H4 característico de aglomerados de partículas que forman poros con forma de placas paralelas, típicas en materiales arcillosos. En la

Tabla 1, se presentan los resultados de las áreas calculadas por el método BET. De acuerdo con esta tabla, se observa que el área del soporte PILC-Zr incrementó más de 10 veces respecto a la montmorillonita, mientras que para los catalizadores impregnados esta disminuyó en el orden siguiente PILC- Zr > 1Ni1Pd > 1Pd.

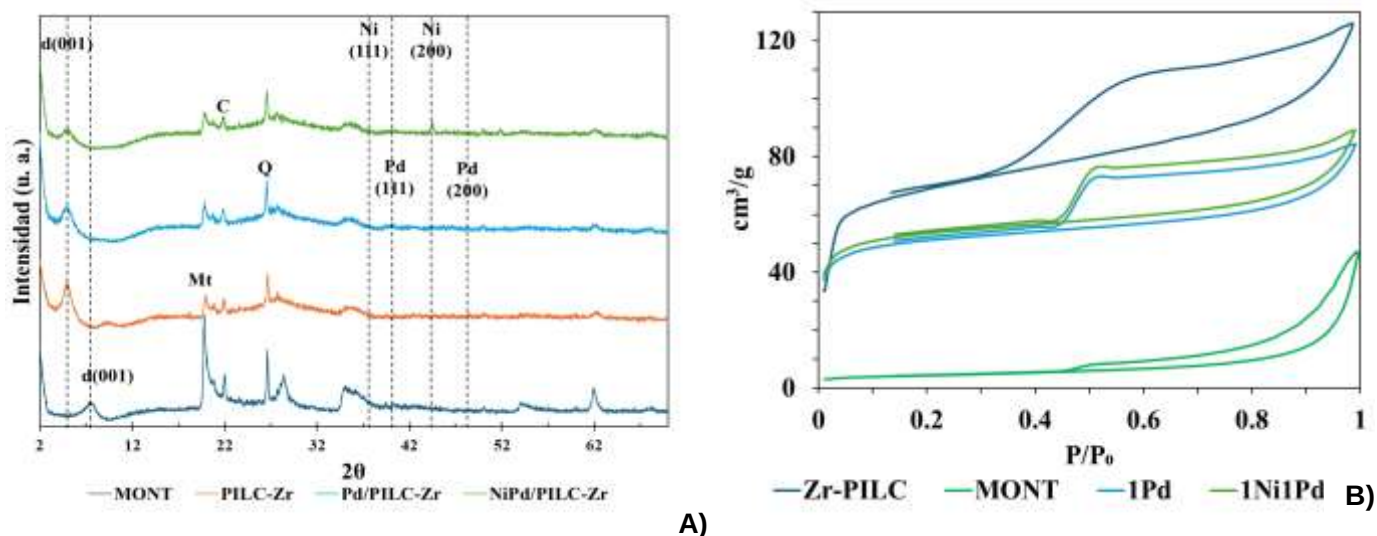


Figura 1. A) Patrones de difracción de la montmorillonita, el soporte, Pd/PILC-Zr y NiPd/PILC-Zr. B) Isothermas de adsorción-desorción de montmorillonita, PILC- Zr, 1Pd y 1Ni1Pd.

4.2 Microscopía Electrónica de Barrido y mapeo por EDS

Por otra parte, la Figura 2 muestra imágenes del mapeo elemental del catalizador bimetalico NiPd/PILC-Zr. Se observo que tanto las especies de Al, Si, y Zr propios del soporte mostraron buena dispersión y una distribución homogénea. Los mapeos elementales de otros catalizadores preparados no se muestran aquí pero también confirmaron la distribución homogénea de especies de Al, Si y Zr en todos los catalizadores. Para el caso de la fase metálica depositada a través del método de impregnación en estado sólido se encontró que para el catalizador Pd un tamaño de partícula promedio de 10 nm, en tanto que para el catalizador bimetalico fue de 36 nm, mostrado en la Tabla 1. Mientras que para los catalizadores con Ni se pudo observar en general partículas de forma irregular y de tamaño cercano a 33 nm. Lo cual se pudiera atribuir a una débil interacción del Ni con el soporte PILC-Zr. Las composiciones químicas del soporte y catalizadores se determinaron mediante análisis SEM-EDS.

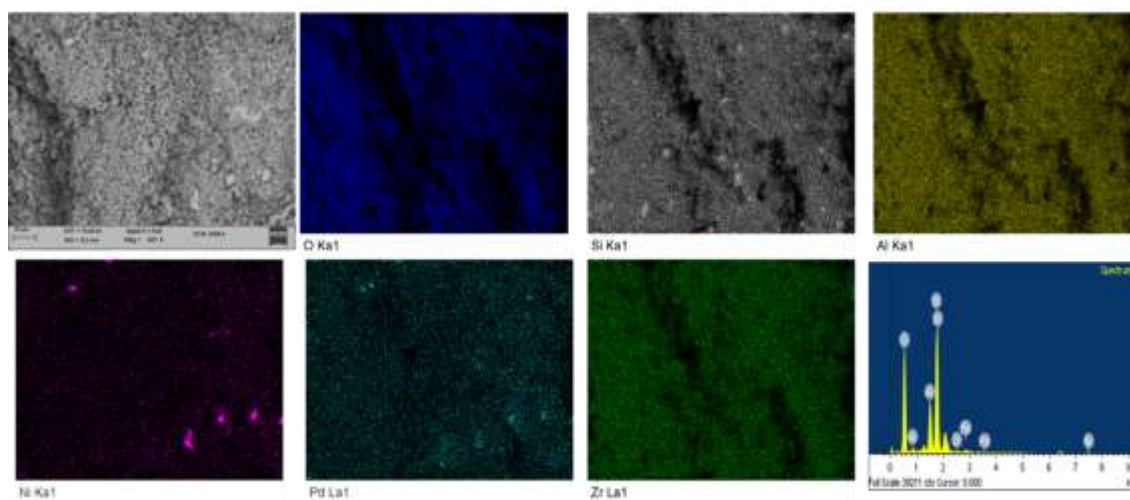


Figura 2. Micrografía MEB, mapeo SEM-EDS y su espectro EDS del catalizador NiPd/PILC-Zr

4.3 Quimisorción de H₂

Los valores de dispersión metálica (D_m) se presentan en la Tabla 2 junto con los datos correspondientes de la superficie específica del metal (S_m), el tamaño medio de partícula metálica (d_p) y el consumo de H₂, obtenidos a través de la técnica de quimisorción de hidrógeno. Para el caso de los catalizadores monometálicos el catalizador de Pd presenta el tamaño medio de partícula metálica más bajo lo cual conlleva a mostrar una dispersión mayor, 41 %, mientras que el catalizador Ni/PILC-Zr presenta un tamaño de partícula metálica mayor, cercana a los 19 nm, lo cual estaría relacionado con una baja interacción con el soporte. Por su parte para el catalizador bimetálico Ni-Pd presento la mayor dispersión, cercana al 83 %, así como el menor tamaño promedio de partícula, incluso es menor con respecto a los catalizadores monometálicos, con lo cual se puede decir que se favoreció un efecto geométrico [9].

Tabla 2. Resultados cuantitativos determinados por quimisorción de hidrógeno para catalizadores Ni, Pd y NiPd sobre PILC-Zr

Catalizador	Consumo de H ₂ ($\mu\text{mol g}^{-1}$)	Dispersión metálica D_m (%)	Área metálica S_m ($\text{m}^2 \cdot \text{g}_{\text{cat}}^{-1}$)	Radio promedio de partícula metálica d_p (nm)
Ni/PILC-Zr	9.11	5.35	0.36	18.89
Pd/PILC-Zr	38.89	41.39	1.84	2.71

4.1.4 Evaluación Catalítica

En la evaluación catalítica del HDT de AO empleando el catalizador bimetálico NiPd se alcanzó una conversión del 44% y un rendimiento a heptadecano (C_{17}) del 41.36 % mientras que para el octadecano (C_{18}) fue cercano al 3% después de 6 h de reacción. Con lo cual se puede ver que la ruta de la descarbonilización/descarboxilación fue favorecida con respecto a la vía de la hidrodesoxigenación (HDO). Mientras que en el HDT de EUG empleando el catalizador NiPd se alcanzó una conversión del 99.6 % y un rendimiento a propilciclohexano (PC) del 31 % siendo el principal producto obtenido y el cual implica el favorecimiento de las reacciones de desmetoxilación e HDO.

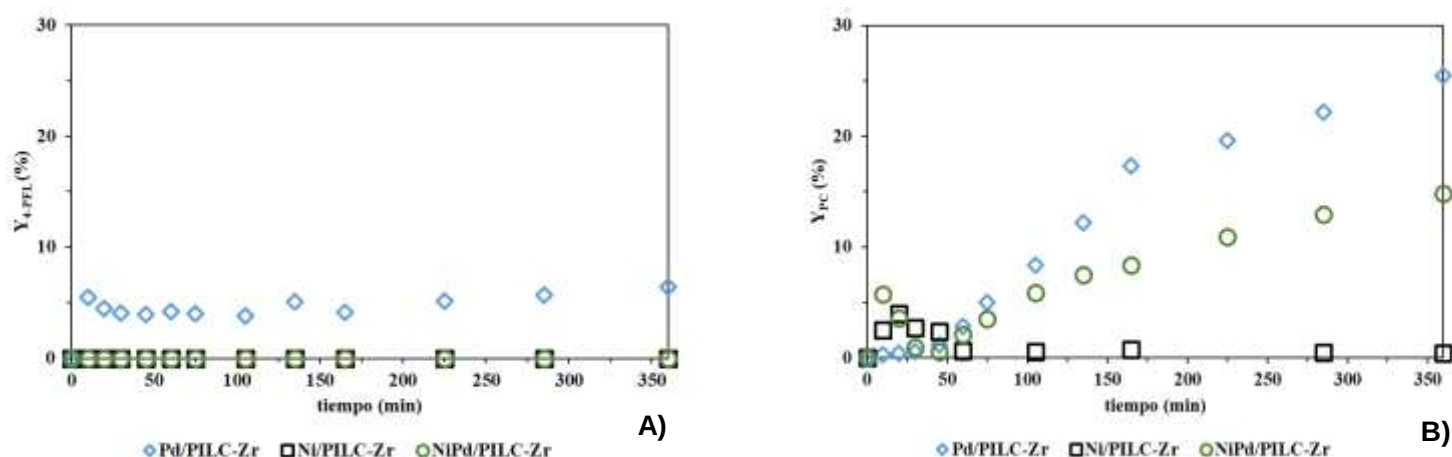


Figura 3. A) Y_{4-PFL} (%) vs tiempo y B) Y_{PC} (%) vs tiempo para los catalizadores Ni, Pd y NiPd sobre PILC-Zr

Para el caso de la mezcla EUG-AO empleando los catalizadores monometálicos Ni y Pd se encontró para el caso del Ni se alcanzó una conversión del 80 %, rendimientos a dihidroeugenol del 30 %, trans-isoeugenol del 12 % y rendimientos menores al 2 % a PC y 4-propoil-fenol (4-PFL), mostrado en la Figura 3 A) y B), mientras que para los productos obtenidos a partir de AO se encontró una conversión del 6% y rendimientos menores al 2 % para C_{17} y C_{18} , ver Figura 4 A) y B). Para el catalizador monometálico de Pd se alcanzó una conversión para el EUG cercana al 99 % a las 6 h de reacción, obteniendo así rendimientos a 4-PFL del 5 % y para el PC del 25 %, presente en la Figura 3B). Con relación al AO se alcanzó una conversión del 40 % y rendimientos a C_{17} y C_{18} del 20 y 7 % respectivamente, ver Figura 4 A) y B).

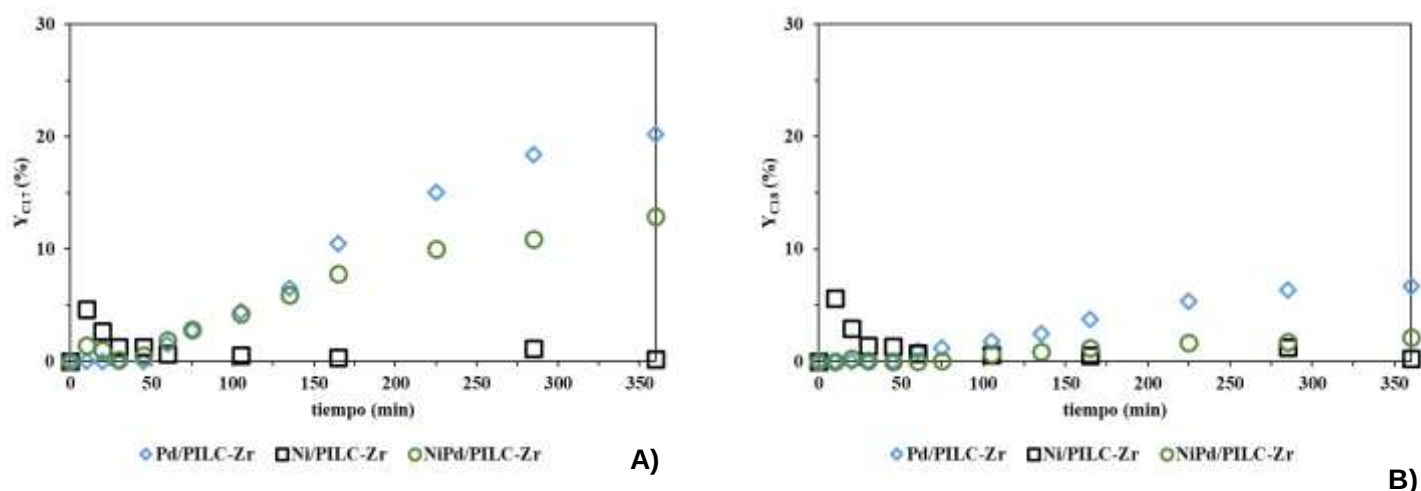


Figura 4. A) Y_{C17} (%) vs tiempo y B) Y_{C18} (%) vs tiempo para los catalizadores Ni, Pd y NiPd sobre PILC-Zr

Por otra parte, para el catalizador bimetálico NiPd/PILC-Zr se alcanzó una conversión de EUG del 81 % y rendimientos del 15 % a PC, 51 % a dihidroeugenol y 16 % a trans-iseoeugenol. Mientras que la conversión asociada al AO fue del 40 % obteniendo rendimientos del 13 % a C_{17} y 2 % a C_{18} , con lo cual se favoreció la ruta de la HDO.

En términos de la obtención de bioturbosina, PC, se encontró el siguiente orden respecto al catalizador empleado para la mezcla Pd > NiPd >> Ni. Lo anterior podría estar asociado a una dispersión del metal debido a su tamaño de partícula (< 10 nm). En términos de la mezcla se detectaron bajos rendimientos a productos eterificados, lo cual podría estar relacionado a una mayor solubilidad de H_2 en el medio de reacción debido al incremento de la relación C/H. Para el caso de los productos vinculados al AO C_{17} y C_{18} (mezclas del diésel verde) se encontró el siguiente orden de reacción Pd > NiPd > Ni. Además, se puede apreciar que para las mezclas se favoreció la ruta de la HDO respecto a la reacción del AO debido a que sólo se detectó la presencia de C_{18} .

5. Conclusiones

En el HDT de la mezcla EUG-AO se favorece la ruta de la HDO de AO lo cual no sucede al realizar el tratamiento de manera individual con el AO. Lo anterior estaría ligado a una mejora en la solubilidad del H_2 en el medio de reacción. El catalizador monometálico de Pd exhibió mejores rendimientos en la mezcla con respecto al bimetálico, lo cual podría estar ligado al tamaño de partícula el cual se determinó a través de MEB y quimisorción de H_2 . Finalmente, una menor presencia de compuestos eterificados del eugenol es atribuible a la mezcla de los bioaceites.

6. Bibliografía

1. U.S Energy Information Administration, Renewable energy explained. En línea, <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>, (9 de agosto del 2024)
2. Zamora-Rodea E. G., García-Rodríguez K. J., González Brambila M. M., Pacheco-Sosa J. G., Colín-Luna J. A., Eugenol hydrodeoxygenation employing bifunctional Ni-Pd and Ni-Pt catalysts on zirconium pillared clays, Tecnología en marcha. Vol. 36, 2215-3241(2023)
3. Lahijani P., Mohammadi M., Mohamed A.R., Ismail F., Lee K., T., Amini G. Upgrading biomass-derived pyrolysis bio-oil to bio-jet fuel through catalytic cracking and

hydrodeoxygenation: A review of recent progress, *Energy Conv. and Manag.*, 268, 115956 (2022).

4. Martinez-Klimov M., Mäki-Arvela P., Narendra Kumar, A. Ç., Markus Peurla, K. E., Hensen, E. J. M., Murzin, D. Y. Bifunctional Pt–Re Catalysts in Hydrodeoxygenation of Isoeugenol as a Model Compound for Renewable Jet Fuel Production. *ACS Eng. Au*, 2, 436–449 (2022).
5. Pinheiro A., Olarte M., Terrell E., García, M. & Han, Y. Co-Hydrotreatment of Yellow Greases and the Water-Insoluble Fraction of Pyrolysis Oli. Part 1: Experimental Desing to Increase Kerosene Yield and Reduce Coke Formation. *Energy and Fuels*, 37,2100-2114 (2023).
6. Roy P., Jahromi H., Rahman T., Baltrusaitis J., Hassan B., Torbert A., Adhikari S. Hydrotreatment of pyrolysis bio-oli with non-edible carinata oli and poultry fat for producing transportation fuels. *Fuel Process- Tech.*, 107753 (2023).
7. Valdés-Martínez O. U., Santolalla-Vargas C. E., Santes V., de Los Reyes J. A., Pawelec B., Fierro J. L. G. Influence of calcination on metallic dispersion and support interactions for NiRu/TiO₂ catalyst in the hydrodeoxygenation of phenol. *Catal. Today*, 329, 149-155, (2019).
8. Geun-Ho H., Min Woo L., Soohyung P., Ho Joong K., Jae-Pyoung A., Myung S., Kwan-Young L., Revealing the factors determining the selectivity of guaiacol HDO reaction pathways using ZrP-supported Co and Ni catalysts. *Journal of Catalysis* 377, 343-357 (2019)
9. Martin Alonso D., Wettstein G. S., Dumesic A. J. Bimetallic catalysts for upgrading of biomass to fuels and chemicals. *Chem. Soc. Rev*, 41, 8075-8098 (2012)

Monitoreo de temperatura y humedad usando un servidor MQTT privado

Vega Luna, J.I.¹, Salgado Guzmán, G.¹, Cosme Aceves F.J.¹, Sánchez Rangel, F.J.¹,
Tapia Vargas, V.N.¹, Rodríguez Tapia, V.G.¹, Andrade González, E.A.²

¹Área de Sistemas Digitales, ²Área de Comunicaciones, Departamento de Electrónica,
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

vlji@azc.uam.mx, gsg@azc.uam.mx, cajf@azc.uam.mx, fjsr@azc.uam.mx,
vtapia@azc.uam.mx, vgrt@azc.uam.mx, eaag@azc.uam.mx

1. Resumen

Durante los últimos años, para el empleo más eficiente en aplicaciones de la Internet de las Cosas, se desarrolló el protocolo ligero de transporte y telemetría MQ. El objetivo de este estudio fue desarrollar un sistema para el monitoreo remoto de la temperatura y humedad de un laboratorio de cómputo, usando un cliente MQTT y un servidor MQTT privado. El cliente, integrado por un sistema embebido Arduino y un sensor, se encarga de publicar los valores de estos parámetros periódicamente. El servidor se implantó usando el software de Mosquitto, instalado en una computadora con sistema operativo Ubuntu. Desde una aplicación ejecutada en un dispositivo móvil, se visualizan los valores de temperatura y humedad. Las pruebas realizadas mostraron que el alcance de la

comunicación WiFi del cliente fue 28 metros y la precisión de la medida de la temperatura y la humedad fue 0.7°C y 0.4%, respectivamente.

2. Introducción

La Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) representa un avance significativo para la interconexión de dispositivos físicos a través de la Internet mediante la incorporación de tecnologías de comunicación, software, controladores y sensores, lo que facilita la recopilación e intercambio de datos, a fin de realizar en tiempo real, monitoreo y control remoto de actuadores.

Las aplicaciones de la IoT cubren diversos sectores como: hogares y oficinas, procesos industriales, cuidado de la salud, ciudades inteligentes y el sector agropecuario, entre otros ^[1]. En el caso de la Industria 4.0, la IoT permite integrar los procesos de manufactura para monitorear y optimizar la producción en tiempo real, utilizando sensores para el mantenimiento predictivo y la gestión de recursos ^[2]. La combinación de la Industria 4.0 con la IoT, ha dado lugar al concepto de la IoT Industrial (IIoT, por sus siglas en inglés), la cual hace referencia a la IoT en entornos industriales, realizando mayor énfasis en la instrumentación y control de sensores y dispositivos que utilizan tecnologías en la nube ^[3].

De esta forma, el monitoreo de procesos mediante la IoT constituye una aplicación clave que transforma la gestión y operación de empresas, instituciones y hogares. Los componentes esenciales de la IoT para el monitoreo remoto de procesos incluyen esencialmente: sensores, actuadores, sistemas digitales de recolección de información conectividad a la Internet, plataformas de almacenamiento y gestión de datos e interfaces de usuario. Los sensores se encuentran instalados en los dispositivos físicos que interactúan directamente con el proceso a monitorear y/o controlar. Permiten obtener la información de las variables del proceso o variables de ambiente como: temperatura, humedad, presión y flujo, por mencionar algunas. Los actuadores son dispositivos utilizados para realizar los movimientos físicos necesarios en un dispositivo. Convierten un tipo de energía, comúnmente eléctrica, neumática o hidráulica, a una fuerza mecánica. Son elementos en una maquinaria que permiten su operación y movimiento, pueden ser interruptores, válvulas, motores, cerraduras y relevadores, entre otros ^[4].

Para leer la información entregada por los sensores y/o controlar los actuadores, se utilizan los sistemas digitales de recolección de datos. Comúnmente se usan controladores o sistemas embebidos que integran diversos recursos como interfaces de entrada, salida y de red, convertidores analógico-digital y digital-analógico, así como

unidades de memoria. Ejemplos de sistemas embebidos son las tarjetas de desarrollo Arduino, la Raspberry Pi y el ESP32. La conectividad a la Internet puede realizarse con una de las diversas tecnologías de comunicación, que han surgido en los últimos años, optimizadas para el tipo de información usado en las aplicaciones de IoT. Algunas de estas tecnologías son: WiFi, Zigbee, LoRa y redes móviles 5G [5]. En este sentido, la conectividad confiable y de baja latencia es crucial para el monitoreo en tiempo real. Respecto a las plataformas de gestión de datos, éstas constituyen la infraestructura de software accedida por medio de la Internet para recibir, almacenar y, en algunos casos, procesar la información recolectada. Cuando procesan la información, se utilizan tecnologías de big data y analítica avanzada, lo cual permite realizar análisis predictivo y tomar decisiones basadas en el comportamiento del proceso monitoreado. Las interfaces de usuario son las aplicaciones utilizadas para visualizar la información de los procesos y, en ocasiones, controlar los dispositivos de la IoT. Estas interfaces se ejecutan en dispositivos móviles o computadoras. Respecto a las plataformas de IoT, existen diferentes proveedores, que, dependiendo el volumen de información enviada a la plataforma, es el costo de uso. En la mayoría de ellas, para cierta cantidad de datos el servicio no tiene costo [6].

En la actualidad, una cantidad importante de aplicaciones y dispositivos de IoT usan los servicios que proporcionan los servidores de las plataformas de IoT en la nube a través del protocolo HTTP [7]. En este protocolo, llamado sin estado, los dispositivos cliente establecen una conexión con el servidor cuando necesiten enviar o recibir datos. El protocolo HTTP puede transferir información de tipo multimedia con grandes cantidades de datos, usando demasiado tiempo, ancho de banda de la red y alimentación eléctrica. Sin embargo, los sensores y actuadores usados en las aplicaciones de IoT, no necesitan un ancho de banda grande, ya que intercambian información con el servidor de forma periódica o eventual. Por tal razón, al inicio de la segunda década de este siglo, se empezó a usar como alternativa el protocolo MQTT [8].

El protocolo de transporte y telemetría MQ (MQTT, por sus siglas en inglés) fue creado por IBM a finales de la década de los 90's y ha ganado reconocimiento y adopción generalizada gracias a su diseño ligero y la capacidad para facilitar la comunicación entre dispositivos mediante el modelo publicar/suscribir, como se muestra en la Figura 1. Este protocolo, estructurado para minimizar la complejidad y la sobrecarga, ha demostrado ser sumamente versátil en diversas aplicaciones, abarcando desde sistemas de monitoreo remoto hasta entornos industriales y domóticos [9]. Los principales componentes del protocolo MQTT son: el servidor, también llamado bróker, y los clientes. El servidor MQTT es una computadora que recibe los mensajes de los clientes y los enruta a los clientes que los necesitan, es un intermediario entre ellos. Es el responsable de recibir, almacenar

y reenviar mensajes a los clientes suscritos a un t3pico. Se puede utilizar un servidor MQTT p3blico o uno privado ^[10]. Existen diferentes plataformas en la Internet que permiten utilizar un servidor MQTT p3blico y una interfaz de usuario, que se accede, como cliente MQTT, desde un navegador, para visualizar los mensajes que recibe y trasmite el servidor. Se encuentran tambi3n disponibles paquetes de software de c3digo abierto para implantar un servidor MQTT privado. Se instalan en los sistemas operativos Linux y Windows. Desde una aplicaci3n que se ejecuta como cliente MQTT, se pueden visualizar los mensajes gestionados por el servidor ^[11].

Un cliente MQTT es un dispositivo que env3a o recibe mensajes MQTT con informaci3n relativa a un proceso o una variable de ambiente. En el contexto del protocolo MQTT, a esta informaci3n se denomina t3pico ^[12]. El cliente puede ser un sistema embebido, una computadora, un dispositivo m3vil o un servidor que recolecta informaci3n de los sensores y la env3a al servidor MQTT a trav3s de publicaciones o puede recibir, por medio de publicaciones del servidor MQTT, la informaci3n a mostrar en una interfaz de usuario ^[13]. En la implantaci3n de los mensajes MQTT para publicar y suscribir se pueden usar funciones de bibliotecas de c3digo abierto o puede realizarse la programaci3n necesaria para llevar a cabo estas tareas en alg3n lenguaje como por ejemplo C, C++ o Python ^[14]. Un cliente puede ser un sistema embebido con un sensor de temperatura y humedad que publique al servidor MQTT los mensajes con el valor de estos par3metros ambientales. Otro cliente puede ser una computadora que reciba los mensajes publicados de la temperatura y la humedad y los procese para realizar alguna tarea ^[15]. El protocolo MQTT es el candidato ideal en aplicaciones que usan dispositivos con poder de procesamiento y capacidad de memoria limitados., tal como los sistemas embebidos utilizados en aplicaciones de monitoreo en tiempo real con IoT ^[16].

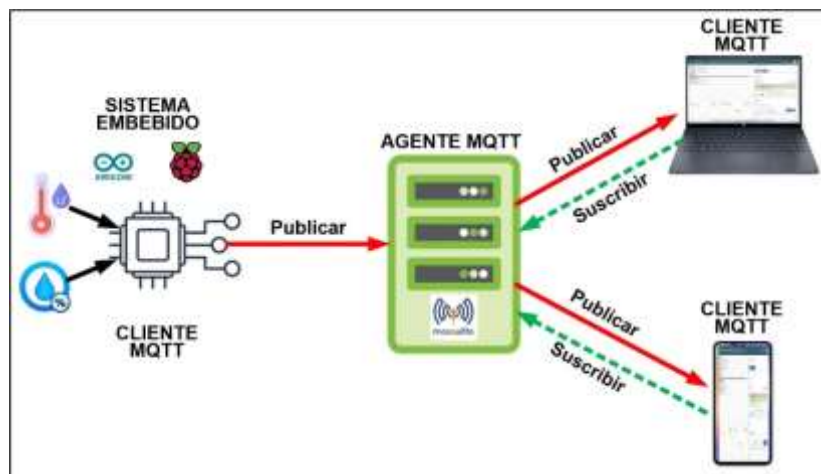


Figura 1. Modelo de publica/suscribir del protocolo MQTT

El objetivo de este estudio fue desarrollar un sistema para el monitoreo remoto de la temperatura y humedad de un laboratorio de cómputo, usando un servidor MQTT privado.

Haciendo una revisión de la literatura y del estado del arte de los estudios llevados a cabo en los últimos años referentes al MQTT, éstos se han enfocado en dos principales líneas de investigación. La primera es el crecimiento exponencial en el desarrollo de aplicaciones derivadas de la IoT ^[17]. Se ha realizado una cantidad importante de sistemas orientados a: la comunicación máquina-a-máquina (M2M, por sus siglas en inglés) ^[18] a la cual se le ha denominado la Internet de las Cosas Industriales (IIoT, por sus siglas en inglés) ^[19], la comunicación y conexión entre vehículos, la cual constituye la tecnología revolucionaria llamada la Internet de Vehículos (IoV, por sus siglas en inglés) ^[20], la telemetría en el sector salud o Internet del Cuidado de la Salud (IoHT, por sus siglas en inglés) ^[21], la Internet de las Cosas Robóticas (IoRT, por sus siglas en inglés) ^[22], así como al monitoreo remoto en hogares, oficinas y en la producción agrícola ^[23]. La segunda línea de investigación es en lo que respecta a mejorar y crear mecanismos de seguridad cada vez más robustos para la comunicación a través del protocolo MQTT ^[24] y en la detección de intrusos para reconocer o predecir ciberataques ^[25].

Las contribuciones del sistema desarrollado son las siguientes: 1) la instalación y operación no son intrusivas, ya que no afectan la infraestructura física ni de red del laboratorio, 2) es escalable, ya que pueden integrarse otros sensores o clientes MQTT para el monitoreo de variables de ambiente o de procesos industriales, 3) es de tamaño compacto y económico, dado que se usaron componentes de código libre y 4) utiliza un servidor MQTT privado, lo cual permite acceder y almacenar con mayor seguridad la información enviada por los clientes.

3. Condiciones experimentales

El procedimiento seguido para desarrollar el sistema fue dividirlo en dos módulos funcionales: el cliente MQTT y el servidor MQTT.

3.1 El cliente MQTT.

El cliente MQTT consta de dos elementos principales: el sistema embebido Arduino UNO WiFi REV2 y el sensor de temperatura y humedad, como se muestra en el diagrama de la Figura 2.

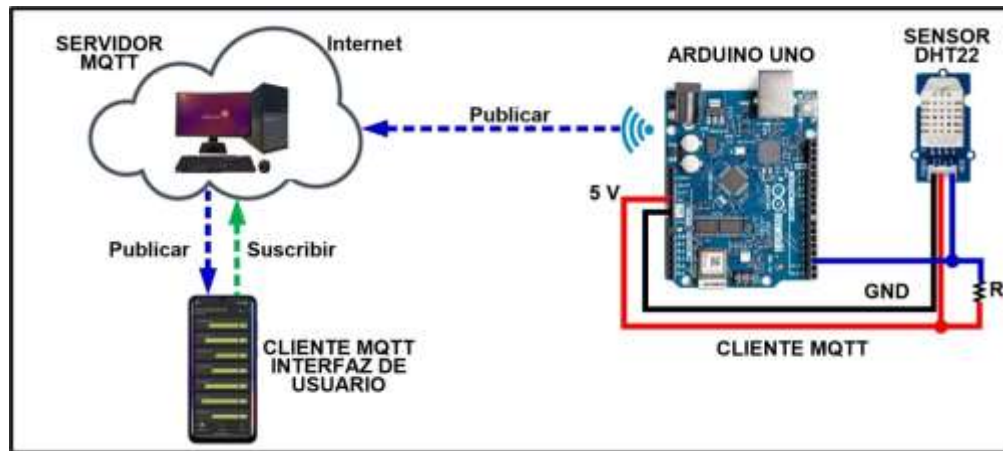


Figura 2. Diagrama funcional del sistema de monitoreo

El Arduino UNO WiFi REV2 es uno de los sistemas embebidos más comúnmente usados en el desarrollo de aplicaciones de IoT por su bajo consumo de energía y los recursos de hardware que integra. Los elementos que componen a este sistema embebido son los siguientes: un microcontrolador ATmega4809, memoria flash de 48 KB, memoria SRAM de 6,144 Bytes, memoria EEPROM de 256 Bytes, 14 terminales de entrada/salida, 6 entradas analógicas, una conexión USB e interfaces de comunicación WiFi, Bluetooth y Bluetooth Low Energy.

El Arduino es una plataforma electrónica de código abierto de tamaño compacto y económico que puede interactuar fácilmente con diferentes ambientes y procesos de IoT, ya que pueden conectarse diferentes tipos de sensores en sus entradas y controlar distintos dispositivos por medio de sus salidas digitales o analógicas. Se programa usando un ambiente de desarrollo (IDE, por sus siglas en inglés) y en lenguaje C++. El IDE integra una cantidad grande de bibliotecas de funciones de código abierto, o pueden descargarse desde la Internet o desarrollarse para realizar una función específica. Todas las características de hardware y software del sistema embebido Arduino permiten realizar aplicaciones de IoT utilizando el protocolo MQTT para garantizar la comunicación confiable y escalable a la nube.

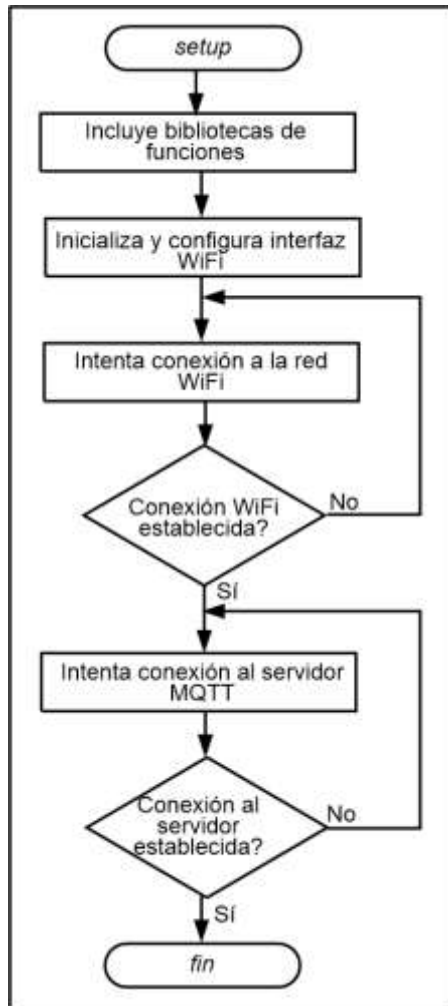
El sensor utilizado fue el dispositivo DHT22. Este sensor permite medir el valor de la temperatura y humedad a través de un encapsulado compacto y económico. Consta de un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir la temperatura ambiente. Incluye un convertidor analógico-digital, un microcontrolador y una interface para proporcionar el valor de temperatura y humedad en forma serie. Se alimenta con voltaje de 3.3V a 5.5V, el rango de temperatura que puede medir es de -40°C a 80°C, con una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ y una resolución de 0.1°C . Trabaja en el rango de 0 a 100% de humedad relativa (RH) con una precisión de 2% y una resolución de 0.1%. El tiempo entre lecturas debe ser de dos segundos mínimo. El encapsulado consta de cuatro terminales, dos son tierra, otra es para la alimentación y la última es la línea de datos de salida serie. La terminal de salida se conectó a la terminal digital de entrada número dos del Arduino.

La programación del cliente MQTT se realizó en lenguaje C++ y tuvo como objetivo publicar los mensajes MQTT de manera periódica al servidor. Los mensajes publican, usando los tópicos */home/labcomputo/temperatura* y */home/labcomputo/humedad*, los valores de la temperatura y la humedad, respectivamente. El periodo de las publicaciones es configurable y por defecto fue 30 segundos. La programación en el IDE de Arduino se compone de dos partes. La primera es la función de inicialización del ambiente, llamada *setup* y la segunda es la función denominada *loop*, la cual consiste en un ciclo que lleva a cabo las tareas del programa.

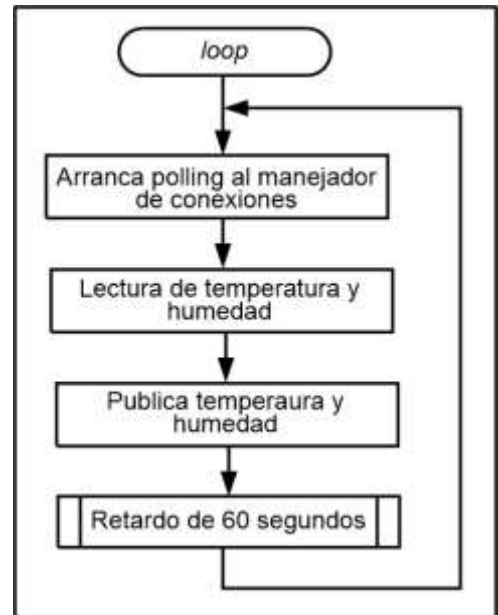
Las acciones que se realizan en la primera función son las siguientes: a) incluye las bibliotecas de funciones *WiFiNINA.h*, *DHT.h* y la del manejo de los mensajes MQTT, b) inicializa y configura la interfaz WiFi para la conectividad a la Internet, c) intenta establecer la conexión a la red WiFi. En caso de no ser exitosa, entra a un ciclo donde continúa estableciéndola y d) una vez conectado el cliente a la red, intenta conectarse al servidor MQTT. En caso de no conectarse al servidor, entra a un ciclo donde continúa reintentando. Estas acciones se indican en el diagrama de flujo de la Figura 3a. La biblioteca *WiFiNINA.h* permite llevar a cabo la comunicación WiFi y puede usarse para el manejo de servidores y para el envío y recepción de paquetes UDP. Puede usarse en redes encriptadas WEP o WPA, la dirección IP asignada al cliente MQTT puede ser estática o por medio del protocolo de configuración dinámica de host (DHCP, por sus siglas en inglés) y puede usar un sistema de nombres de dominio (DNS, por sus siglas en inglés).

Una vez realizada la inicialización del ambiente, se ejecuta la segunda función. En esta función se ubica el programa que se ejecuta cíclicamente. Las tareas llevadas a

cabo en esta función se indican en el diagrama de flujo de la Figura 3b y son las siguientes: i) arranca el sondeo o polling del manejador de conexiones MQTT.



(a)



(b)

Figura 3. Diagramas de flujo de las funciones de inicialización del ambiente y del ciclo

Esta es una característica o mecanismo del protocolo MQTT, mediante el cual un cliente mantiene activa o viva la conexión al servidor enviando periódicamente paquetes de control llamados *PINGREQ*. El servidor debe responder transmitiendo paquetes denominados *PINGRESP* para confirmar que la conexión permanece activa. Esta tarea se realiza mediante la función *mqttClient.poll* y sirve para detectar fallas en la red o desconexiones entre el cliente y el servidor, ii) realiza la lectura de la temperatura y la

humedad y la conversión a números de punto flotante utilizando las funciones *float dht.readTemperature* y *float dht.readHumidity*, respectivamente, iii) publica los valores anteriores usando las funciones *mqttClient.beginMessage(tópico)*, *mqttClient.print(temperatura/humedad)* y *mqttClient.endMessage*, iv) invoca una rutina de retardo de 30 segundos y v) continua el ciclo.

3.1 El servidor MQTT.

El servidor MQTT fue de acceso privado. Esto significa que, a pesar de que puede accederse desde la Internet, su configuración y operación están bajo control y responsabilidad del administrador del laboratorio de cómputo donde éste se encuentra. Se implantó usando el software Eclipse Mosquitto 2.0.18 instalado en una computadora con sistema operativo Linux-Ubuntu 22.04.1 LTS.

El software Eclipse Mosquitto es de licencia pública, el cual permite implementar servidores de mensajes MQTT versiones 5.0, 3.1.1 y 3.1. Es ligero e ideal para usarse en dispositivos de bajo consumo de energía y en servidores, lo cual es útil en aplicaciones de IoT. Mosquitto proporciona una biblioteca de funciones que permite el desarrollo de servidores y clientes MQTT a través de una línea de comandos. En este estudio, se realizó un programa en Shell que se ejecuta permanentemente y lleva a cabo las tareas siguientes: A) arranca el servidor MQTT, B) recibe los valores de temperatura y humedad publicados por el cliente, los almacena en un archivo de texto para mantener un registro histórico de ambos parámetros y C) publica los mensajes MQTT con los tópicos */home/labcomputo/temperatura* y */home/labcomputo/humedad*.

Como interfaz de usuario, para visualizar los valores de temperatura y humedad, se utilizó la aplicación *MQTT Client*, la cual se ejecuta en un dispositivo móvil con sistema operativo Android. Esta aplicación no tiene costo, es fácil de configurar y usar e implementa un cliente que puede suscribirse y publicar a un servidor MQTT mensajes para un tópico. En este estudio, la aplicación *MQTT Client* se configuró para suscribirse a los tópicos correspondientes de la temperatura y la humedad publicados por el servidor.

4. Resultados y discusión

Para probar el funcionamiento y la operación del sistema se realizaron dos conjuntos de pruebas. Considerando que el sistema fue desarrollado para ser usado en un laboratorio de cómputo, fue necesario determinar el alcance de la comunicación WiFi del

cliente MQTT con el punto de acceso WiFi del laboratorio. Por tal razón, en el primer conjunto de pruebas se incluyó en el programa del cliente una función que mide el valor del indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés) y lo muestre en el monitor serie del IDE de Arduino cada vez que el cliente realiza una publicación. El RSSI permite determinar el nivel de potencia y la calidad de la señal de radiofrecuencia recibida con cualquier tecnología inalámbrica después de la posible pérdida en el medio físico y la antena. La función utilizada para determinar el valor de RSSI en el cliente MQTT fue *WiFi.RSSI*, la cual está incluida en la biblioteca *WiFi.h*. Esta función retorna el valor de la intensidad en dBm, que, entre más cercano sea a cero, es mayor la intensidad de la señal recibida. De esta manera, se realizaron 20 pruebas. En cada una de ellas se ubicó el cliente a una distancia distinta del punto de acceso con línea de vista. Las pruebas iniciaron instalando el cliente a cuatro metros y el valor de RSSI fue -50 dBm. En cada prueba aumentó la distancia. Los resultados mostraron que el valor de RSSI disminuyó conforme aumentó la distancia, como se muestra en la gráfica de la Figura 4, de manera tal que, para valores de RSSI menores a los -72 dBm la comunicación con el punto de acceso se perdió. Esto sucedió a los 28 metros, lo cual se consideró como el alcance de la comunicación WiFi del cliente MQTT.

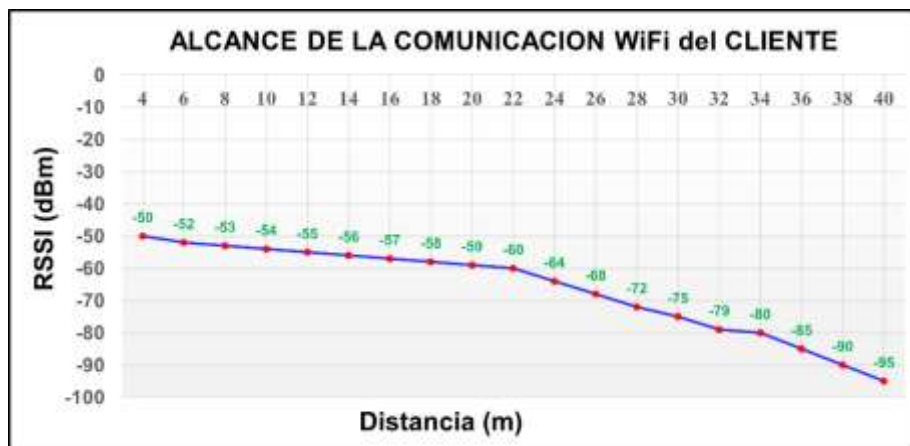


Figura 4. Alcance de la comunicación WiFi del cliente

El segundo conjunto de pruebas tuvo como fin determinar la exactitud de los valores de la temperatura y la humedad reportados en la interfaz de usuario. Se llevaron a cabo 20 pruebas, en las que se varió el valor de estos parámetros y se comparó el valor reportado respecto a los obtenidos con un medidor de temperatura y uno de humedad profesionales. Los resultados obtenidos indicaron que la precisión de la temperatura

medida por el sistema fue menor a 0.7°C y la de humedad fue menor a 0.4% en el rango de 18°C a 55°C.

5. Conclusiones

Se obtuvo un sistema que permite monitorear remotamente, a través de la Internet, los valores de temperatura y humedad en un laboratorio usando un cliente MQTT y un servidor privado MQTT. Los valores de ambos parámetros se pueden visualizar en una aplicación que se ejecuta en un dispositivo móvil. La combinación de un sistema embebido, como el Arduino usado en este estudio, con el protocolo MQTT permitieron desarrollar una solución eficiente de IoT.

El sensor de temperatura y humedad proporciona una lectura cada dos segundos, lo cual podría verse como una limitación. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones de IoT este tiempo es aceptable, tal como se realizó en este trabajo donde el cliente envía estos valores al servidor por medio de publicaciones MQTT cada 30 segundos. Por otra parte, el sistema realizado es completamente escalable de manera sencilla y rápida, ya que pueden integrarse clientes MQTT y sensores que midan otras variables ambientales o parámetros de procesos a monitorear. Solo es necesario incorporar a la programación del cliente las funciones correspondientes para publicar los mensajes MQTT con los tópicos correspondientes a las variables leídas. Esto permitirá crear, si es necesario, una red de clientes MQTT.

Dado que el protocolo MQTT fue creado para usarse en redes seguras, carece de mecanismos sofisticados de seguridad y necesarios para las proteger la información de las vulnerabilidades que se presenten en la Internet. Por esta razón, se está trabajando en una mejora al sistema aquí presentado, la cual consiste en integrar a la programación del cliente el uso del protocolo de seguridad de la capa de transporte (TLS, por sus siglas en inglés). Esto no implica cambios significativos en el hardware ni en el software, ya que la operación del protocolo se encuentra entre la capa de aplicación y la capa TCP/IP de la red de datos.

6. Bibliografía

1. Alasmari R., Alhogail A. A., "Protecting Smart-Home IoT Devices From MQTT Attacks: An Empirical Study of ML-Based IDS", IEEE Access, vol. 12, pp. 25993-26004, 2024.
2. Xiao Y., Pei E., Wang K., Zhou W., Xiao Y., "Design and Research of M2M Message Transfer Mechanism of Looms for Information Transmission", IEEE Access, vol. 10, pp. 76136-76152, 2022.
3. Mishra B., Kertesz A., "The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey", IEEE Access, vol. 8, pp. 201071-201086, 2020.

4. Odongo G. Y., Musabe R., Hanyurwimfura D., Bakari A. D., "An Efficient LoRa-Enabled Smart Fault Detection and Monitoring Platform for the Power Distribution System Using Self-Powered IoT Devices", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 73403-73420, 2022.
5. Cujilema Paguay J. A., Hidalgo Brito G. A., Hernandez Rojas D. L., Cartuche Calva J. J., "Secure home automation system based on ESP-NOW mesh network, MQTT and Home Assistant platform", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 7, pp. 829-838, 2023.
6. Philip N. Y., Rodrigues J. J. P. C., Wang H., Fong S. J., Chen J., "Internet of Things for In-Home Health Monitoring Systems: Current Advances, Challenges and Future Directions", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 2, pp. 300-310, 2021.
7. Buccafurri F., De Angelis V., Lazzaro S., "MQTT-I: Achieving End-to-End Data Flow Integrity in MQTT", *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, Early Access Article, 2024.
8. Longo E., Redondi A. E. C., Cesana M., Manzoni P., "BORDER: A Benchmarking Framework for Distributed MQTT Brokers", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 18, pp. 17728-17740, 2022.
9. Buccafurri F., De Angelis V., Lazzaro S., "MQTT-A: A Broker-Bridging P2P Architecture to Achieve Anonymity in MQTT", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 17, pp. 15443-15463, 2023.
10. Laghari S. u. A., Li W., Manickam S., Nanda P., Al-Ani A. K., Karuppayah S., "Securing MQTT Ecosystem: Exploring Vulnerabilities, Mitigations, and Future Trajectories", *IEEE Access*, Early Access Article, 2024.
11. Kosaka K., Noda Y., Yokotani T., Ishibashi K., "Implementation and Evaluation of the Control Mechanism Among Distributed MQTT Brokers", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 134211-134216, 2023.
12. Shahri E., Pedreiras P., Almeida L., "A Scalable Real-Time SDN-Based MQTT Framework for Industrial Applications", *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 5, pp. 215-235, 2024.
13. Rodriguez L. G. A., Batista D. M., "Resource-Intensive Fuzzing for MQTT Brokers: State of the Art, Performance Evaluation, and Open Issues", *IEEE Networking Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 100-104, 2023.
14. Quincozes S., Emilio T., Kazienko J., "MQTT Protocol: Fundamentals, Tools and Future Directions", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 09, pp. 1439-1448, 2019.
15. Park C. -S., Nam H. -M., "Security Architecture and Protocols for Secure MQTT-SN", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 226422-226436, 2020.
16. Soua R., Palattella M. R., Stemper A., Engel T., "MQTT-MFA: A Message Filter Aggregator to Support Massive IoT Traffic Over Satellite", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 16, pp. 14928-14937, 2022.
17. Amoretti M., Pecori R., Protskaya Y., Veltri L., Zanichelli F., "A Scalable and Secure Publish/Subscribe-Based Framework for Industrial IoT", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 6, pp. 3815-3825, 2021.
18. Gündoğan C. et al., "The Impact of Networking Protocols on Massive M2M Communication in the Industrial IoT", *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 4, pp. 4814-4828, 2021.
19. Kim G., Kang S., Park J., Chung K., "An MQTT-Based Context-Aware Autonomous System in oneM2M Architecture", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8519-8528, 2019.
20. Chouali S., Boukerche A., Mostefaoui A., Merzoug M. A., "Formal Verification and Performance Analysis of a New Data Exchange Protocol for Connected Vehicles", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 12, pp. 15385-15397, 2020.
21. Bhatti D. S., Hussain M. M., Suh B., Ali Z., Akobir I., Kim K. -I., "IoT-Enhanced Transport and Monitoring of Medicine Using Sensors, MQTT, and Secure Short Message Service", *IEEE Access*, vol. 12, pp. 46690-46703, 2024.

22. Yoshino D., Watanobe Y., Naruse K., "A Highly Reliable Communication System for Internet of Robotic Things and Implementation in RT-Middleware With AMQP Communication Interfaces", IEEE Access, vol. 9, pp. 167229-167241, 2021.
23. Tran D. T., Le H. S., Huh J. -H., "Building an Automatic Irrigation Fertilization System for Smart Farm in Greenhouse", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Early Access Article, 2023.
24. Zhao B. et al., "A Large-Scale Empirical Study on the Vulnerability of Deployed IoT Devices", IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, vol. 19, no. 3, pp. 1826-1840, 2022.
25. Siddharthan H., Deepa T., Chandhar P., "SENMQTT-SET: An Intelligent Intrusion Detection in IoT-MQTT Networks Using Ensemble Multi Cascade Features", IEEE Access, vol. 10, pp. 33095-33110, 2022.

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UN DINAMÓMETRO DE BANCO PARA MOTORES DE TURISMO

Aguilar, H.Y¹, Lopes, J¹, Vazquez, J.R², Esquivel, R.C¹, Vicente, W¹, Gonzalez, R², , Rincon, P² ,
Hernández, M.A²

¹Instituto de Ingeniería, UNAM.

²UNICE, Facultad de ingeniería, UNAM.

yosef_1568@outlook.es, jat.lop.rey.2809@gmail.com, jricardovdd@gmail.com,
resquivelh@iingen.unam.mx, wvicenter@ii.unam.mx,

rog1950@unam.mx, pirg@unam.mx, criaturaverde21@gmail.com

1.Resumen

Para realizar investigación en tecnología para el control y la reducción de las emisiones de motores de combustión interna, dichos motores se analizan en dinamómetros de banco. En el presente artículo se describe el desarrollo de la instrumentación para uno de estos dinamómetros. Esta instrumentación es desarrollada para instalarse en los diferentes dinamómetros con los que cuenta el laboratorio UNICE de la Facultad de Ingeniería, UNAM. La instrumentación es capaz de medir la velocidad angular del motor, la carga que se le aplica, la potencia y el consumo de combustible. La información es mostrada de dos formas diferentes: una interfaz en computadora y por medio de pantallas LCD colocadas en un gabinete.

2.Introducción

Un dinamómetro de banco o banco dinamométrico es el sistema empleado para aplicar una potencia controlada a un motor automotriz y analizar su desempeño, eficiencia y consumo de combustible. Para ello se requieren medir parámetros como el par, la velocidad angular, consumo de combustible, potencia y emisiones contaminantes ^[1].

En la Figura 1 se muestra el dinamómetro de banco para motores de hasta 350 hp con el que cuenta el Laboratorio de Motores y Vehículos de la Unidad de Investigación de Control de Emisiones (UNICE) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El dinamómetro tiene con un motor v6 3100 sfi l82^[2] y un freno de la marca TELMA modelo OC442066.



Figura 1. Dinamómetro de banco con motor V6 del laboratorio UNICE UNAM.

El Laboratorio de Motores y Vehículos cuenta con diferentes dinamómetros de banco, por lo cual es necesario diseñar una instrumentación modular que se pueda adaptar a cada uno de estos equipos. Esto con el objetivo de investigar tecnologías para el control y la reducción de emisiones.

La instrumentación puede ser operada de dos formas diferentes: mediante el uso de pantallas de LCD que, junto con perillas y botones, facilitan la operación del sistema, y a su vez puede ser controlado mediante una interfaz programada en LabVIEW®.

3. Condiciones experimentales

3.1 Tacómetro

La instalación que permite medir la velocidad angular consiste en un disco con 36 perforaciones, el cual se encuentra acoplado a la flecha del freno. Por medio de un sensor inductivo, el cual detecta la presencia de objetos metálicos.

El sensor utilizado es el Schneider XS608B1PAL2, de tipo PNP. Las características más representativas del sensor son una distancia nominal de medición de 2.5 mm, voltaje nominal de alimentación de 12 V a 48 V y protección contra inversión de polaridad^[3].

3.1.1. Circuito acondicionador

La señal del sensor inductivo requiere un acondicionamiento externo, debido a que el valor del voltaje de la señal de salida es el mismo de alimentación y, de acuerdo con la ficha técnica, el sensor debe ser alimentado con al menos 12 V.

Para acondicionar la señal se diseñó un divisor de voltaje por medio de un diodo Zener 1N4733, el cual limita el voltaje de la señal de entrada al microcontrolador 5 V. El circuito de acondicionamiento se ilustra en la Figura 2.

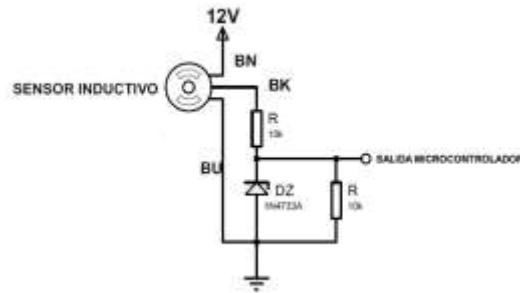


Figura 2. Diagrama de conexión, la señal de salida del sensor inductivo y el circuito acondiciona ^[4].

3.1.2. Frecuencia

El sensor inductivo produce una señal digital que es procesada mediante el microcontrolador PIC16F628A. Para calcular el periodo entre cada ciclo de la señal, se utiliza el módulo Timer1, el cual es un contador de 16 bits ^[5], el valor máximo que puede medir antes de desbordarse es de 65535.

Este contador incrementa su valor en una unidad con cada pulso del cristal oscilador del microcontrolador. La resolución del contador puede incrementarse mediante el valor de un preescalador establecido en el programa; mediante la siguiente expresión se calcula el periodo de tiempo que equivale a un incremento de una unidad en el contador T , donde p_s es el valor del preescalador y f_{osc} es la frecuencia del cristal oscilador:

$$T = \frac{4 p_s}{f_{osc}} \quad (1)$$

Considerando que se utiliza un preescalador de 8 y un cristal oscilador de 10MHz; la frecuencia mínima que mide el sistema es de 4.6967 Hz y la máxima de 312.5 KHz. Para poder calcular la velocidad angular del disco en revoluciones por minuto ω , se utiliza la fórmula:

$$\omega = \frac{60}{36 T N} \quad (2)$$

Donde 36 es el número de perforaciones en el disco acoplado a la flecha del freno y N es el incremento en el valor del contador en un período de la señal del sensor inductivo.

3.2. Sistema de control del acelerador del motor

El control del acelerador del motor incluye un chicote que está montado en el cuerpo de aceleración, el cual está acoplado a un brazo de palanca, el cual lo tensa para alcanzar una aceleración deseada.

Adicionalmente, el sistema cuenta con un husillo montado entre centros que permiten el desplazamiento angular del mismo y, gracias a que existe una conexión entre el husillo y un collarín, tiene un desplazamiento lineal que es transmitido a un brazo de palanca apoyado en un centro, en la figura 3 muestra cada parte de sistema mecánico de aceleración.

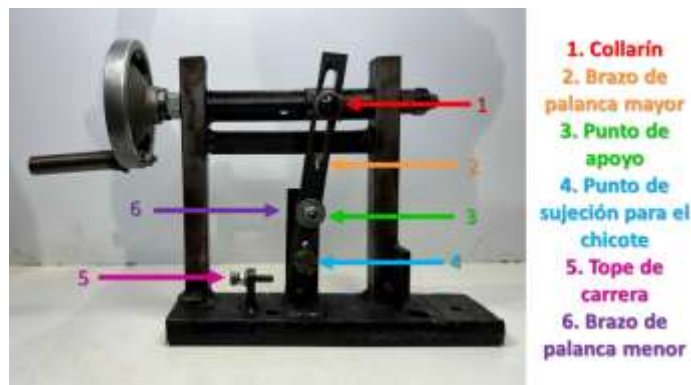


Figura 3. Descripción de partes del control de aceleración por medio de una palanca

El acelerador junto con la unidad de absorción de potencia permite controlar la velocidad y potencia del motor.

3.3. Sistema de medición de par motriz

La celda de carga es un dispositivo diseñado para medir fuerzas, la que se utiliza para este tipo de banco dinamométrico es del tipo S. Dicha celda utiliza galgas extensiométricas de lámina metálica

configuradas en modo de puente de Wheatstone. Estas se deforman y cambian su resistencia cuando se les aplica una fuerza lo que produce una variación de voltaje del orden de milivoltios.

La celda de carga se encuentra acoplada a la unidad de absorción de potencia por medio de un brazo de palanca y a la estructura del dinamómetro de banco.

En la figura 4 se muestra la celda de carga de la marca Braunkor con una capacidad de 250 lb y una sensibilidad de $3.0 \pm 0.003 \text{ mV/V}$. La entrada de voltaje recomendada por el fabricante es de 10-12V DC y tiene un error $\pm 0.03\%$ ^[6].



Figura 4. Celda de carga utilizada de la marca Braunkor de 250 lb.

Con la celda de carga se mide la fuerza aplicada en kilogramos fuerza. Multiplicada por la gravedad podemos obtener en unidades de Nm.

3.3.1. Módulo HX711

Debido a que la señal de salida de la celda de carga es de milivoltios es necesario acondicionarla para que pueda ser leída por un microcontrolador. Se emplea el módulo HX711, que es un convertidor analógico-digital de 24 bits específico para celdas de carga, para acondicionar la señal. El módulo produce un valor digital proporcional a la fuerza aplicada a la celda de carga^[7].

3.3.2. Calibración de la celda de carga

La celda de carga se debe calibrar para conocer la constante de proporcionalidad que relaciona al valor leído por el módulo con la fuerza medida por el sensor. Para ello, la celda se precarga con un peso conocido y se obtiene un factor de calibración F_c por medio de la siguiente ecuación 3^[8]:

$$F_c = \frac{L_M}{F_c} \quad (3)$$

Donde L_M es el valor leído por el módulo y F_c es el peso conocido.

Para el manejo de la celda de carga se desarrolló un sistema con dos botones físicos y una pantalla LCD. El sistema puede calibrarse mediante tres masas de calibración de peso conocido que se tienen en el laboratorio, una de 2.142, 2.150 y 4.480 kg. Adicionalmente, la celda puede calibrarse con todas las masas al mismo tiempo.

3.4. Unidad de absorción de potencia

La unidad de absorción de potencia es el sistema encargado de aplicar carga sobre el motor. La unidad utilizada, cuya foto puede apreciarse en la figura 5, es el freno de corrientes parásitas OC442066 marca TELMA con un peso de 125 kg, un par máximo aplicable de 900 N m, y una velocidad máxima de 4500 rpm ^[9].



Figura 5. Unidad de absorción de potencia marca TELMA modelo OC442066.

3.4.1. Control por modulación de ancho de pulso

Debido a que el freno opera con corriente directa, el control de la unidad de absorción de potencia utiliza la modulación por ancho de pulso. Esta técnica está basada en la variación del ciclo de trabajo de una señal cuadrada, lo que permite determinar la relación entre tiempo de encendido y apagado de la señal. La señal de modulación por ancho de pulso de control se genera por medio de comparadores de voltaje. Como comparadores se utiliza un módulo de amplificadores operacionales TL084, ya que dentro de su encapsulado cuenta con cuatro amplificadores operacionales de alta velocidad.^[10]

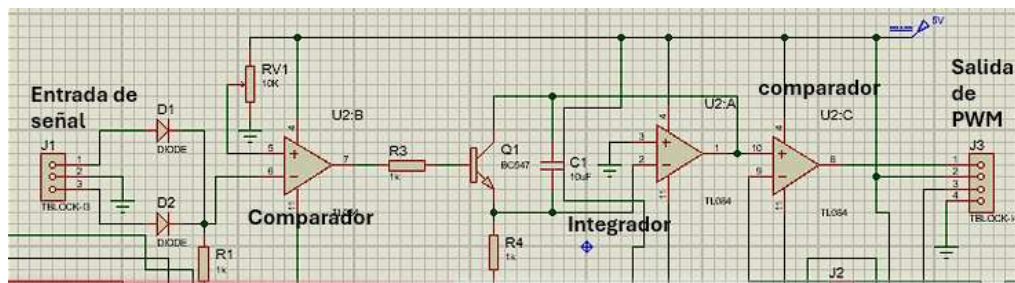


Figura 6. Diagrama de circuito de modulación por ancho de pulso.

Como se muestra en la figura 6 el circuito de control comienza con la señal senoidal de la red eléctrica, posteriormente se rectifica y, por medio de comparadores y un circuito integrador, se obtiene la señal modulada por ancho de pulso. Como la señal rectificada se obtiene a partir de la red eléctrica, la señal de modulación por ancho de pulso esta sincronizada con la misma, no obstante, no cuenta con la corriente necesaria para poder accionar al freno. Para aumentar la corriente, esta señal se emplea para encender al relevador de estado sólido 50R2D^[11] marca Silicon Power Cube, el cual se encuentra conectado en serie con un transformador que reduce el voltaje de 127 VAC a 12VDC y proporciona una corriente máxima de 40 A. Tanto el relevador y como el transformador están conectados a un puente rectificador PRT200A16^[12] de 200 A y 1600 V. La salida del puente rectificador es un voltaje de DC conectado a la unidad de absorción de potencia.

El porcentaje del ciclo de trabajo aplicado varía de 0 a 100% y puede tanto visualizarse como controlarse desde una pantalla LCD mediante un potenciómetro.

3.5. Sistema de medición de consumo de combustible

Para poder medir el consumo de combustible se conectaron sensores de flujo de combustible, colocados en las líneas de ida y retorno respectivamente; por su grado de precisión y debido a que son capaces de mantener una precisión constante a pesar de las condiciones cambiantes de viscosidad del fluido, se optó por colocar sensores de engranajes ovalados.

Los sensores de engranajes ovalados para flujo utilizan elementos de medición mecánicos para dividir continuamente el fluido en una sola porción de volumen conocida. Uno de los engranajes cuenta con un imán que gira y activa un sensor de efecto Hall, el cual produce una señal digital.



Figura 7. Medidor de flujo marca Scintex de modelo SFFM2030L.

En la figura 7 se muestra uno de los medidores de flujo ocupados, estos son de la marca Scintex modelo SFFM2030L, tienen un intervalo de medición de 20 a 300 litros por hora, una precisión de $\pm 1\%$, una presión máxima de trabajo de 10 MPa y, de acuerdo con el fabricante, deben ser alimentados con 3-24 VDC ^[13].

3.5.1. Caracterización de los sensores de flujo

Para conocer la porción de volumen de fluido que corresponde a un pulso del sensor, se hizo pasar 300 mililitros de agua destilada por los medidores de flujo y se contabilizó el número de pulsos que los sensores produjeron; este procedimiento se repitió 10 veces para cada uno de los sensores, y los resultados se promediaron.

Para el sensor ubicado en la línea de ida se obtuvo un promedio de 2676 pulsos por litro y para la línea de retorno se obtuvo un promedio de 2080 pulsos por litro. Conociendo el número de pulsos por litro de los sensores N_p , y la frecuencia de la señal producida por el sensor f_f , se calcula el flujo $\dot{V}$ en L/H en cada sensor por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{V} = \frac{3600 f_f}{N_p} \quad (4)$$

El procesamiento de esta señal se realizó con un PIC16F628A.

3.6. Protocolo de comunicación

El protocolo de comunicación está diseñado para usar dos tipos de comunicación por medio de serial e I2C entre microcontroladores Arduino y PIC, como se muestra en la figura 8.

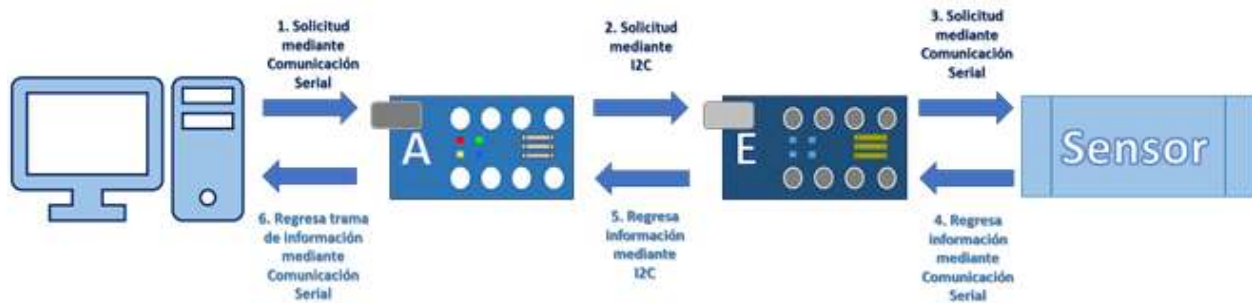


Figura 8. Diagrama de protocolo de comunicación entre la interfaz y el sensor.

Primero, la computadora se comunica mediante comunicación serial con un microcontrolador central (Arduino Mega), denominado maestro y le solicita un reporte de todos los sensores conectados. El maestro comprueba que le están solicitando información, y en caso de que así sea, por medio de comunicación I2C, solicita información a los diferentes microcontroladores periféricos denominados esclavos (Arduino Uno R3). Cada uno de los esclavos se comunica mediante el protocolo serial con el microcontrolador de un sensor.

Cuando el esclavo solicita la información al sensor, este responderá únicamente si recibe la instrucción mediante una clave propia de cada sensor y cada esclavo.

Cada sensor regresa la información al esclavo y este, a su vez, reenvía la información al maestro, el maestro recopila la información de cada esclavo y la acomoda en una cadena de caracteres con el formato `Asensor1Bsensor2Csensor3D`. Esta cadena se envía por comunicación serial a la computadora, donde la interfaz programado en LabVIEW® realiza los cálculos correspondientes y presenta la información en una interfaz gráfica como se muestra en la figura 9, y la almacena en un archivo de Excel®.

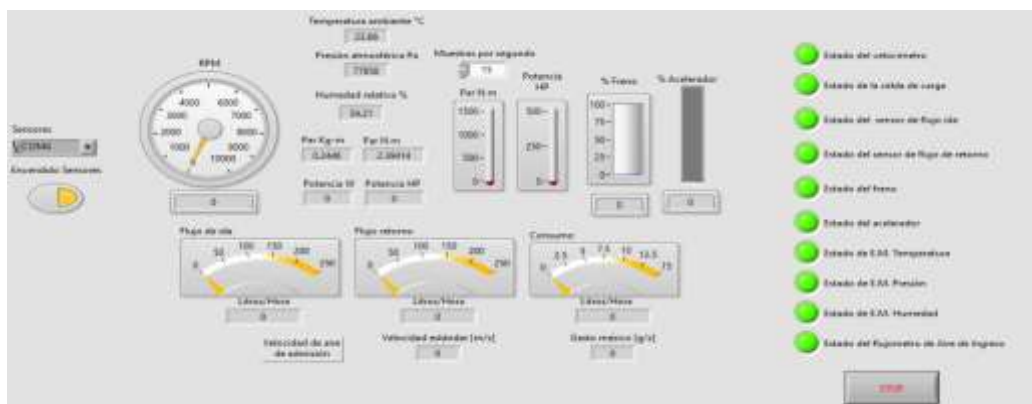


Figura 9. Interfaz de adquisición de datos de la instrumentación en LabVIEW®.

4. Resultados y discusión

Se realizaron pruebas estáticas en un dinamómetro de banco. Estas consistieron en llevar el motor a un estado conocido (un régimen y un par motor); es decir, el motor se aceleró hasta una velocidad angular preestablecida mientras se le aplicaba una cierta cantidad de carga constante.

Las pruebas realizadas fueron a tres diferentes regímenes de velocidad, y con tres diferentes porcentajes de ciclo de trabajo aplicado al freno de corrientes parásitas, de 0%, 33% (en el que la corriente aplicada es de 3 A) y 57% (que corresponde a 6 A de corriente). La duración de cada prueba fue de tres minutos y la frecuencia de muestreo fue de 15 muestras por segundo. En la Figura 9 se muestran los valores medidos del motor de par, velocidad y consumo de combustible de cada prueba.

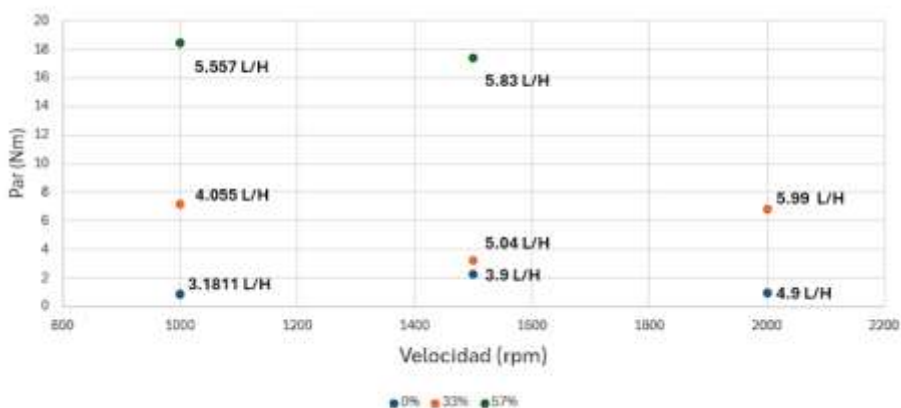


Figura 10. Promedio de datos obtenidos de las 9 diferentes pruebas a 1000, 1500 y 2000 rpm con diferente carga.

En la figura 10 se puede observar que el consumo de combustible incrementa al incrementar el par aplicado o la velocidad angular del motor. Esto concuerda con los valores esperados.

Adicionalmente, se puede observar que a una velocidad de 1500rpm el par medido fue distinto al de las demás velocidades, a pesar de que se aplicara el mismo porcentaje de ciclo de trabajo al freno.

5. Conclusiones

Se desarrolló una instrumentación modular que permite medir la velocidad angular, el par, el flujo de la línea de ida de combustible y el flujo de retorno de combustible en un motor de combustión interna. Con estos parámetros se puede calcular la potencia y el consumo de combustible del motor. Este sistema se incorporó a los diferentes dinamómetros del laboratorio UNICE: un dinamómetro de banco con motor V6, un dinamómetro de banco con un motor Mercedes diésel, y dos dinamómetros de chasis, uno para vehículos medianos y otro para motocicletas. Se realizaron pruebas en el dinamómetro con un motor V6, obteniendo resultados exitosos.

A futuro se planea reemplazar el sistema de control mecánico de aceleración por un sistema electromecánico controlado por computadora, además de incorporar una estación meteorológica y un sistema de refrigeración para la unidad de absorción de potencia. Adicionalmente, se analizará el error, precisión y repetibilidad de los sistemas al compararlos con sistemas certificados de medición.

5.1. Agradecimientos

Agradecemos el apoyo que proporcionó la DGAPA a través del Proyecto PAPIIT IG 100 222 “Modificaciones estimadas del parque vehicular en la Ciudad de México hacia las décadas 30's y 40's, así como su impacto en las emisiones de contaminantes atmosféricos criterio y gases de efecto de invernadero”, y al proyecto GII “Intensificación de los procesos para la obtención de biocompuestos a partir de agua residual”.

6. Bibliografía

1. De Metrología, C. N. (s. f.). ¿Qué es un dinamómetro vehicular y cómo se usa para la medición de. . . gob.mx? <https://www.gob.mx/cenam/articulos/que-es-un-dinamometro-vehicular-y-como-se-usa-para-la-medicion-de-emisiones-contaminantes-de-los-vehiculos?idiom=es#:~:text=El%20dinam%C3%B3metro%20es%20un%20instrumento,el%C3%A1stica%20de%20un%20resorte%20calibrado>.
2. Duran, O. (24 de Marzo de 2023). *Descubre todo sobre el potente motor 3100 SFI V6 del Malibu*. Obtenido de HIFERAUTO.ES: https://hiferauto.es/motor/motor-3100-sfi-v6-malibu/?expand_article=1
3. html.alldatasheet.com. (s. f.). XS608B1PAL2 datasheet (3/33 Pages) SCHNEIDER. Helping You To Find The Most Efficient Solution. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1244877/SCHNEIDER/XS608B1PAL2/1724/3/XS608B1PAL2.html>
4. instrumentación para un banco dinamométrico. (2024). [Tesis de licenciatura]. UNAM.
5. html.alldatasheet.com. (s. f.-a). PIC16F628A datasheet (2/168 Pages) MICROCHIP. FLASH-Based 8-Bit CMOS Microcontrollers. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/74968/MICROCHIP/PIC16F628A/823/2/PIC16F628A.html>
6. Celda. (s. f.). La Casa de la Bascula. Recuperado 30 de julio de 2024, de <https://www.lacasadelabascula.com/PDF/NINDEFY.pdf>
7. html.alldatasheet.com. (s. f.-a). HX711 datasheet(1/9 Pages) AVIA. 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) For Weigh Scales. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1132222/AVIA/HX711/109/1/HX711.html>
8. Tutorial transmisor de celda de carga HX711, Balanza Digital. (s. f.). Naylamp Mechatronics - Perú. https://naylampmechatronics.com/blog/25_tutorial-trasmisor-de-celda-de-carga-hx711-balanza-digital.html

9. Welcome to TELMA USA. (s. f.). <https://www.telmausa.com/technical-support/manuals-guides?id=87>
10. html.alldatasheet.com. (s. f.-c). TL084 datasheet (1/11 Pages) STMICROELECTRONICS. GENERAL PURPOSE J-FET QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/25385/STMICROELECTRONICS/TL084/1619/1/TL084.html>
11. Relés de estado sólido (SSR) - Ficha Técnica. (s. f.). Tecnología y Electrónica En Control. Recuperado 30 de julio de 2024, de <https://www.tecsc.com.ar/media/pdf/ficha-rele-estado-solido.pdf>
12. SUMINISTROS Y CONTROLES ELECTRONICOS S A. (2023, 21 noviembre). Puente Rectificador Trifásico 1600Vac 200A PRT200A16 - Suconel | Tienda electrónica | Colombia. Suconel | Tienda Electrónica | Colombia. <https://suconel.com/product/puente-rectificador-trifasico-1600vac-200a-prt200a16/>
13. Engine fuel Flow Pulse meter. (s. f.). Scintex Australia. <https://www.scintex.com.au/products/engine-fuel-flow-meter-pulse>

Codificador-Decodificador CELP en tiempo real

Maillard, Y. ,¹ Escobar, L.H. ,¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales.

Yvesmq126@hotmail.com, esco_lar@yahoo.com

1. Resumen

El trabajo presenta un codificador-decodificador (CODEC) de voz excitado por código y basado en predicción lineal (CELP) que puede emplearse en tiempo real. El codificador permite comprimir la señal de voz utilizando una representación paramétrica de la misma. La representación paramétrica se emplea para reconstruir la señal y contiene el 10% de la cantidad de bits de la señal original. La señal reconstruida presenta una calidad subjetiva razonable respecto a la original favoreciendo a voces masculinas sobre femeninas y la distorsión introducida por el codificador mantiene el mensaje inteligible.

2. Introducción

Este trabajo presenta un codificador de voz tipo CELP que puede emplearse en tiempo real y cuyo objetivo es la compresión de señales de voz. Los codificadores multipulso y CELP fueron propuestos por Atal, Remde y Schroeder a mediados de la década de 1980 [1], [2], [3], [4]. Estos codificadores toman como base la codificación lineal predictiva (LPC) y LPC multipulso (MPLPC). En MPLPC, se busca generar una secuencia de pulsos a la entrada del filtro todo polo de LPC con el fin de crear una señal de voz sintética. Esta señal se compara con la voz original generando un error, el cual se pondera para producir una medida de la diferencia perceptual entre la señal de voz original y

la sintética. La señal sintética busca reproducir lo más parecido posible la señal de voz original. En el algoritmo CELP los pulsos se seleccionan de un "codebook" que contiene vectores o secuencias, usualmente de ruido blanco aleatorio, y la señal de error ponderada se retroalimenta con el fin de modificar la secuencia de pulsos elegida.

Variaciones del algoritmo CELP se encuentran en codificadores como Speex y los estándares G.729, G.728 que han sido evaluados y modificados en años recientes, por ejemplo, en el año 2000 [4], en 2015 [6] y en 2019 [7], [8].

3. Condiciones experimentales

Se implementó el codificador y decodificador CELP siguiendo los diagramas de bloques de las Figuras 1 y 2. El codificador CELP de la Figura 1 presenta tres etapas: *Análisis*, *Síntesis* y *Cálculo y minimización del error*.

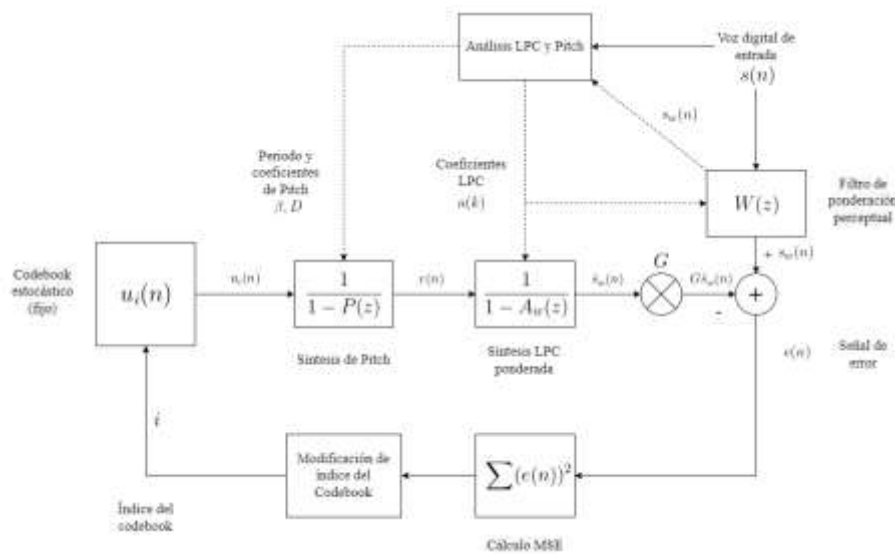


Figura 1. Diagrama de bloques del codificador CELP implementado

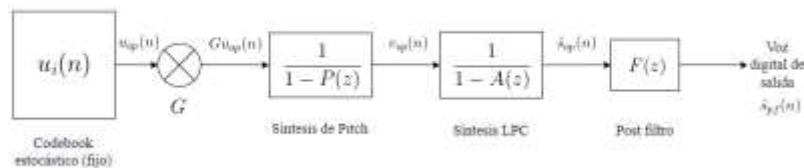


Figura 2. Diagrama de bloques del decodificador CELP implementado

Al finalizar la codificación se obtiene un conjunto de parámetros que representan a la señal de voz original. Estos parámetros se muestran en la *Tabla 1*. El decodificador se basa en la etapa de síntesis dentro del codificador y funciona a partir de los parámetros resultantes de la codificación.

Tabla 1. Parámetros obtenidos por el codificador CELP

Parámetro(s)	Cantidad elegida	Descripción
$a(k)$	12	Coeficientes del análisis LPC
D, β	1,1	Periodo de Pitch (en muestras) y ganancia de Pitch (predicción Pitch)
G	1	Ganancia de la secuencia del codebook
i	1	Índice de la secuencia dentro del codebook (óptima)

3.1 Funcionamiento del CODEC

El codificador realiza las tres etapas mencionadas previamente de manera secuencial utilizando un conjunto de parámetros elegidos al inicio de la codificación. En la etapa de análisis se toma un bloque de la señal original de entrada $s(n)$, de 20 ms de duración. Se aplica una función de ventana de Hamming al bloque y se determinan los coeficientes necesarios para el filtro de síntesis LPC. La determinación de los coeficientes se realiza resolviendo las ecuaciones de Yule-Walker a través de la inversión de la matriz de autocorrelación utilizando el algoritmo de Levinson-Durbin.

Una vez determinados los coeficientes LPC, el bloque de análisis se divide en sub-bloques de 10 ms. Para cada sub-bloque se realiza:

1. Estimación del periodo D y ganancia β , de Pitch en lazo abierto. Se realiza a partir de la señal de voz ponderada $s_w(n)$ y hallando los máximos de la función de autocorrelación normalizada (NCF).
2. Filtrado de señales de excitación. Se colocan en cascada los filtros de síntesis y de ponderación perceptual, a partir de su salida se determina la señal de excitación óptima y su ganancia asociada. Este proceso se realiza de manera iterativa filtrando cada secuencia o vector dentro del codebook y calculando el MSE hasta encontrar el vector que genere el menor MSE entre las señales ponderadas $s_w(n)$ y estimadas $\hat{s}_w(n)$. Para reducir el tiempo de procesamiento en esta etapa se hace uso de un codebook gaussiano traslapado.
3. Finalmente se limpia la memoria de los filtros y se genera la señal de voz sintética a partir de la secuencia del codebook óptima elegida.

Los parámetros del bloque de datos de salida del codificador implementado son los utilizados al realizar la síntesis de voz con la señal de excitación óptima elegida, la cantidad de parámetros utilizados se muestra la *Tabla 1*.

El decodificador implementado se observa en la *Figura 2*, y como se mencionó previamente, se basa en la etapa de síntesis del codificador siendo una versión modificada de esa etapa. A diferencia de la codificación, en la decodificación no se cuenta con la señal original de voz y los coeficientes de los filtros de síntesis, la secuencia de excitación óptima dentro del codebook y su respectiva ganancia se encuentran

determinados, por lo que no es necesario añadir el filtro de ponderación perceptual. Además, el decodificador cuenta con un postfiltro.

La forma de ligar las etapas del CODEC CELP propuesto, la descripción detallada de cada bloque, el cálculo de las ganancias durante la codificación y la implementación por software se realizaron siguiendo los algoritmos mostrados en [9].

3.2 Evaluación del CODEC

La codificación descrita emplea un modelo que produce una señal de voz estimada. Esta señal estimada se asemeja a la original, pero cuenta con distorsión introducida por el modelo y el proceso de generación de la señal. La calidad de la señal producida, y por ende la del CODEC, se puede determinar a partir de la similitud entre las señales original y sintética.

Los métodos de evaluación de calidad buscan valorar al codificador tanto de manera objetiva como subjetiva. Para el codificador implementado, la evaluación objetiva se realizó a partir de parámetros que calculaban el error presente en la señal estimada y la distorsión introducida por el codificador. Por otro lado, la evaluación subjetiva se llevó a cabo empleando el algoritmo PSQM [10], el cual es un método basado en la percepción auditiva humana. El algoritmo PSQM simula experimentos en los que un conjunto de sujetos de prueba juzgan la calidad subjetiva de codificadores de voz, a través de la comparación de la señal codificada y la señal original [10].

PSQM mapea las señales originales y codificadas a una representación psicofísica que asemeja, lo más cercano posible, a la representación humana interna que se tiene de la señal [10]. PSQM juzga la calidad de la voz codificada con base en las diferencias dentro de la representación interna de las señales. Una vez que se obtiene esta representación para ambas señales, se calcula una función de error conocida como la función de perturbación de ruido y con ésta se calcula la perturbación de ruido promedio, la cual está directamente relacionada a la calidad de la voz codificada.

La descripción completa del algoritmo PSQM y su implementación por software se encuentra en [9] y [10]. Los resultados obtenidos con PSQM, así como su transformación a la escala de puntaje de opinión media (MOS) se muestran en la sección siguiente.

3.3 Señales y condiciones de prueba

Las pruebas y resultados del codificador y decodificador se realizaron sobre señales de voz grabadas. Las señales de voz empleadas corresponden a un conjunto de frases, las cuales fueron habladas y grabadas. Las frases que se pronunciaron durante

la grabación fueron tomadas del *Apéndice I* de la *Recomendación ITU-T P.50* de la ITU [11], [12], donde se encontraban enlistadas de manera escrita.

Las señales fueron grabadas a *16 bits* y considerando una frecuencia de muestreo $F_s = 8 \text{ [kHz]}$. En la *Tabla 2* se muestran las señales empleadas para las pruebas y sus características. La producción, grabación y ecualizado de las señales se realizó de acuerdo con lo descrito en [10], [13] y [14]. Las pruebas realizadas y las condiciones de las mismas surgieron a partir de la consideración del *Procedimiento para la medición de la calidad objetiva* de codificadores de voz descrito en [10].

Tabla 2. Características de señales para pruebas

Hablante	Idioma	Frase	Duración [s]
Masculino	Inglés	1.The ship was thorn apart on the sharp reef, 2. Jazz and swing fans like fast music	3
Masculino	Español	1.Esa señora venía mucho a mi casa, 2. La habitación da a una plaza antigua	3
Femenino	Inglés	1.The ship was thorn apart on the sharp reef, 2. Jazz and swing fans like fast music	3
Femenino	Español	1.Un jinete se separó de la sombra, 2. La cigüeña es un ave zancuda	3

Los parámetros empleados por el codificador durante las pruebas se describen de manera resumida en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Resumen de parámetros utilizados durante la codificación y decodificación

Parámetro	Valor
Análisis LPC	
Longitud de ventana	160 muestras
Traslape	80 muestras (50 %)
Función de ventana	Hamming
Número de coeficientes LPC, p	12
Análisis Pitch	
Método de estimación de Pitch	NCF
Número de coeficientes Pitch, β	1
Filtro de ponderación perceptual	
Factor de ponderación, γ	0.85
Generador de excitación	
Tamaño del codebook, K	1024

Dimensión del vector, N	80 muestras
Traslape entre vectores	79 muestras
Postfiltro	
$\alpha, \beta_{op}, \mu, \zeta$	0.9, 0.7, 0.3, 0.96

4. Resultados y discusión

Las señales de referencia, pertenecientes al material de prueba descrito previamente sirvieron como entrada al CODEC CELP implementado. Las *Figuras 3 y 4* comparan una señal de voz de referencia y su respectiva señal resultante de la codificación. La *Figura 3* muestra las señales en el tiempo para un hablante masculino y la *Figura 4* muestra los correspondientes espectrogramas.

En la *Figura 3* se observan diferencias en las formas de onda de las señales. Estas diferencias se deben a factores inherentes al algoritmo de codificación implementado.

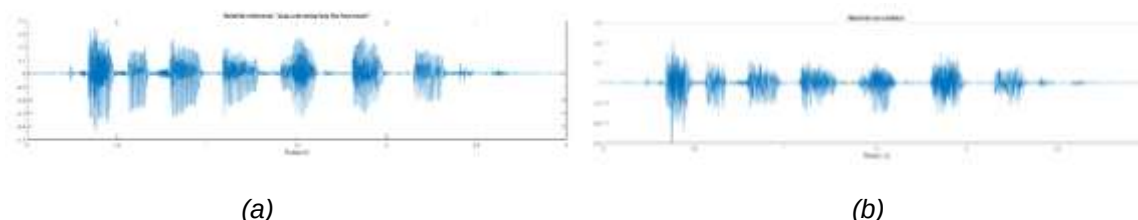


Figura 3. Resultados de la codificación. Hablante masculino, frase 2 en idioma inglés: “Jazz and swing fans like fast music”. (a) Voz original (b) Señal decodificada

El efecto de la degradación más notorio se relaciona a la estimación del periodo de Pitch durante el análisis y a la estabilidad del filtro de síntesis de Pitch durante la síntesis. En múltiples segmentos el periodo de Pitch determinado para subventanas consecutivas variaba en mayor medida haciendo que la periodicidad presente en los segmentos de la señal sintética no correspondiera a la señal de referencia. La degradación observable en la señal sintética, debida a la inestabilidad del filtro de síntesis de Pitch y a las diferencias en los periodos de Pitch, es más notoria en las ventanas donde existe una transición de segmento voceado a no voceado.

Aunque el codificador conserva la predominancia de componentes en bajas frecuencias y los espectrogramas de las voces sintéticas son similares a los de sus respectivas referencias, también introduce ruido. En segmentos donde el espectro de las voces de referencia se observa distribuido en todo el intervalo de frecuencias, el

codificador añade contenido en frecuencia notorio conforme el espectro se aproxima a $F_s/2$. Por otro lado, en los segmentos donde las voces de referencia presentan la mayor energía, el codificador realza componentes en frecuencia cuya energía es menor, esto se debe a la estimación realizada con el filtro de síntesis LPC y a la naturaleza aleatoria de las señales de excitación.

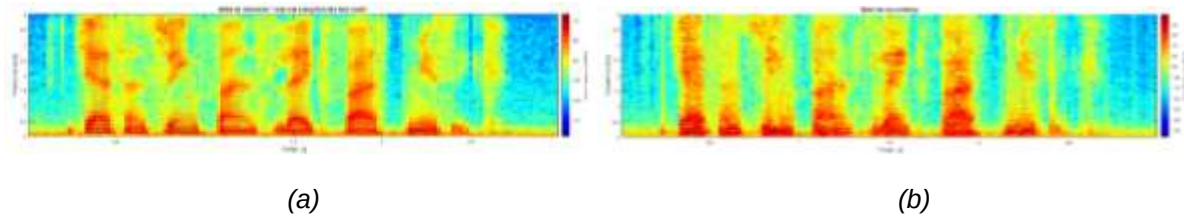


Figura 4. Comparación de espectrogramas Hablante masculino, frase 2 en idioma inglés: “Jazz and swing fans like fast music”. (a) Voz original (b) Señal decodificada

El género del hablante afectó las señales resultantes de la decodificación. Para los hablantes masculinos, las formas de onda obtenidas se asemejan más a sus respectivas referencias en comparación con las de los hablantes femeninos.

4.1 Evaluación y desempeño del CODEC

El codificador implementado se evaluó, de manera objetiva y subjetiva, mediante el cálculo de un conjunto de parámetros. Los parámetros objetivos calculados se muestran en la *Tabla 4* para algunas frases. La descripción y cálculo de estos parámetros objetivos se realizó como se muestra en [9].

Tabla 4. Resultados del análisis objetivo del codificador

Frase / Hablante	LPC P.Gain, G_F [dB]	Pitch P.Gain, G_P [dB]	MSE	SNR [dB]	SSNR [dB]
The ship was thorn apart on the sharp reef (M)	15.71786	-0.4799	0.00222	2.85961	2.84809
Esa señora venía mucho a mi casa (M)	14.39563	-0.55606	0.00218	2.93661	2.91718
Jazz and swing fans like fast music (F)	14.69826	-0.20882	0.00163	2.59225	2.95894
La cigüeña es un ave zancuda (F)	17.41445	-0.24647	0.00178	2.83625	2.77115

En todos los casos mostrados, la ganancia de estimación LPC fue positiva, es decir, el error de estimación fue mucho menor a la señal original por ventana y el codificador logró obtener la envolvente espectral de la voz por segmento. Aunque la ganancia de estimación de Pitch conducía a una menor ganancia de estimación total, $G_T = G_F + G_P$ [dB], la eliminación del filtro de síntesis de Pitch no significaba una mejora en la calidad subjetiva de la voz sintética.

Para todas las voces sintéticas generadas, las SNR y SSNR fueron positivas haciendo que el mensaje y las voces generadas fueran inteligibles.

Por otro lado, se realizó una evaluación subjetiva del codificador con el algoritmo PSQM (sección 3.2). Los valores obtenidos mediante PSQM indican la calidad en una escala acotada entre 0 y 6.5 ^[10], siendo 0 el valor para la mejor calidad y 6.5 para la peor. Si la señal de voz a evaluar es idéntica, de manera auditiva, a la original, recibirá un puntaje $PSQM = 0$, por el contrario, si presenta distorsión tan notoria que enmascara la señal original o la vuelve ininteligible, recibirá un puntaje $PSQM = 6.5$. Este principio de comparación de señales hace que PSQM sea adecuado para pruebas de puntaje de categoría de degradación (DCR) ^[15], pero también se pueden transportar a puntajes de categoría absoluta (ACR), como el descrito en ^[15] para obtener MOS ^[10].

Aunque el valor PSQM por sí solo resulta útil para determinar la calidad subjetiva de un codificador ^[10], este valor puede emplearse para estimar un valor de calidad en otra escala, ya sea ACR o DCR ^[10]. Usualmente, para la evaluación subjetiva de un codificador, se presentan los valores MOS. Los valores MOS presentados corresponden a las escalas de calidad mostradas en ^[13], que dan un puntaje entre uno y cinco como se presenta en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Escalas de evaluación de calidad de voz

Puntaje MOS	Escala de calidad	Escala de degradación
1	Mala	Degradación muy molesta
2	Pobre	Degradación molesta
3	Razonable	Degradación ligeramente molesta
4	Buena	Degradación audible pero no molesta
5	Excelente	Degradación inaudible

La relación entre valores PSQM y MOS no necesariamente es igual para diferentes lenguajes e incluso para diferentes sujetos dentro de un mismo lenguaje. Esto hace que la obtención de una función que transforme el valor PSQM a MOS resulte complicado. En ^[16] y ^[17] se presenta una función logística de transformación de la cual surgió la función de transformación empleada:

$$L(PSQM) = \frac{5.0303}{1 + e^{PSQM - 5.1062}} \quad (1)$$

La *Tabla 6* muestra los resultados de la evaluación de calidad subjetiva, para algunas de las frases, empleando el algoritmo PSQM así como los valores MOS después de aplicar la función de transformación mostrada anteriormente. El codificador presenta una calidad subjetiva razonable que favorece a las voces predominantemente masculinas sobre las femeninas. Además, el codificador presenta una mejor calidad para voces en español que para voces en inglés, esto debido a la cantidad de sonidos no voceados presentes en las frases. También se puede notar que la asimetría existente entre los espectros de las señales originales y codificadas es detectada e influye notoriamente dentro de PSQM.

Tabla 6. Resultados del análisis subjetivo del codificador

Frase	PSQM	MOS
The ship was thorn apart on the sharp reef	5.3074	2.26292
Esa señora venía mucho a mi casa	4.6591	3.06817
Jazz and swing fans like fast music	5.2996	2.27263
La cigüeña es un ave zancuda	5.48433	2.04515

La codificación se realizó por software mediante un conjunto de funciones y siguiendo los algoritmos expuestos en [9]. Las funciones expuestas fueron las necesarias para codificar cada ventana de señal. La determinación de la secuencia de excitación óptima es el proceso con mayor complejidad computacional, en consecuencia, la elección del tamaño del codebook K , utilizado será determinante de la complejidad y el tiempo de proceso necesario para llevar a cabo la codificación. En el peor de los casos, la complejidad computacional de la codificación es $O(K, n) = Kn$ con $K \gg n$ y para el caso cuando $K=n$, la complejidad en el peor de los casos es $O(n^2)$.

El tiempo de procesamiento necesario para llevar a cabo la codificación de la señal de entrada depende de los recursos de hardware y software con los que se cuenten. Para el codificador propuesto, la implementación se realizó en lenguaje C y se efectuó una medición del tiempo de procesamiento considerando los valores de tiempo medios obtenidos después de realizar la codificación para una misma señal un total de diez veces. Los resultados muestran que se necesitan aproximadamente $16 [ms]$ para obtener la representación paramétrica de cada ventana de señal de $20 [ms]$ de duración por lo

que el codificador implementado puede utilizarse en tiempo real en las condiciones expuestas previamente y utilizando los parámetros mostrados.

El CODEC implementado permite reconstruir la señal de voz original a partir de 16 parámetros (*Tabla 1*). Para cada ventana de la señal, se obtienen 16 parámetros representativos de la ventana, es decir, la ventana queda comprimida a 16 parámetros a 16 bits cada uno. Considerando una ventana de 20 [ms] de duración y $F_s = 8000$ [Hz], cada ventana de señal original tiene 160 muestras representadas a 16 bits por muestra. A partir de esto se puede calcular la tasa de compresión R_c , del codificador mediante la ecuación 2.

$$R_c = \frac{M_{spf} b_{ps}}{N_{ppf} b_{pp}} \quad (2)$$

Donde M_{spf} es la cantidad de muestras por ventana, N_{ppf} es la cantidad de parámetros obtenidos por ventana, b_{ps} es la cantidad de bits utilizados para cuantizar cada muestra y b_{pp} la cantidad de bits utilizados para cuantizar cada parámetro.

Para el codificador implementado, la tasa de compresión R_c resulta $R_c = 160/16 = 10$, es decir, **la compresión es de 10:1**. Y por lo tanto el *porcentaje de datos* empleados para la representación la representación es de **10% de la señal fuente**.

5. Conclusiones

El codificador implementado puede utilizarse por hablantes de inglés o español y para diferentes tipos de voz, favoreciendo las voces cuyo contenido espectral predomine en bajas frecuencias, usualmente voces masculinas pronunciando frases con mayoría de sonidos voceados.

La codificación CELP sintetiza la señal por subventanas de procesamiento, en el esquema implementado el tamaño de la señal sintetizada por ventana es igual al traslape entre ventanas, es decir, no es necesario subdividir cada ventana para procesarla y generar la señal sintética, resultando en una búsqueda y determinación de señal de excitación más eficiente.

El codebook elegido permitió estimar la señal de voz partiendo solamente de señales de excitación tipo ruido gaussiano, sin embargo, su naturaleza aleatoria afectó el desempeño del codificador.

El codificador implementado genera una representación paramétrica de 16 parámetros logrando una tasa de compresión de 10:1 o del 10%. En relación a la calidad,

la señal estimada a partir de los parámetros presenta una calidad razonable en la escala MOS, $MOS \sim 3$ y el mensaje dentro de ella se mantiene inteligible, $SNR > 2.5$.

Para realizar la codificación, el algoritmo propuesto necesita aproximadamente $\sim 16[ms]$ considerando las condiciones expuestas previamente y utilizando los parámetros mostrados.

6. Bibliografía

1. Atal, B., "The history of linear prediction", Signal Processing Magazine, IEEE, 23:154–161 (2006).
2. Atal, B. and Remde, J., "A new model of lpc excitation for producing natural-sounding speech at low bit rates" In ICASSP '82. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, volume 7, pages 614–617 (1982).
3. Schroeder, M. and Atal, B., "Code-excited linear prediction(celp): High-quality speech at very low bit rates" In ICASSP '85 (1985).
4. Schroeder, M. and Atal, B. "Stochastic coding of speech signals at very low bit rates: The importance of speech perception" Speech Communication, 4(1):155–162 (1985).
5. Xueying, Z., "Real-time implementation of a 12.8 kbit/s ld-celp speech codec" In WCC 2000 - ICSP 2000. 2000 5th International Conference on Signal Processing Proceedings. 16th World Computer Congress 2000, volume 2, pages 683–686 vol.2 (2000).
6. Sunder, D. S. and Kushwaha, R. K., "Evaluation of narrow band speech codecs for ubiquitous speech collection and analysis systems" In 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), pages 93–98. (2015).
7. Kirillov, S. and Dmitriev, V., "Selection and justification of primary speech codec under the action of acoustic noise" In 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), pages 1–4 (2019).
8. Lo, Y., Wang, S., Tsao, Y., and Peng, S., "A pruned-celp speech codec using denoising autoencoder with spectral compensation for quality and intelligibility enhancement" In 2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS) (2019).
9. Maillard, Y. "Codificador-decodificador de voz en tiempo real". Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM (2023).
10. International Telecommunication Union (ITU). "ITU-T recommendation p.861. series p: Telephone transmission quality, Methods for objective and subjective assessment of quality. Objective quality measurement of telephone band (300 – 3400 Hz) speech codecs" Technical report, International Telecommunication Union (ITU) (1996).
11. International Telecommunication Union (ITU). "ITU-T recommendation p.50 - appendix I. series p: Telephone transmission quality, telephone installations, local line networks. Objective measuring apparatus. Artificial voices, Appendix I." Technical report, International Telecommunication Union (ITU) (1988 - 1999).
12. International Telecommunication Union (ITU). "ITU-T recommendation p.50. series p: Telephone transmission quality, telephone installations, local line networks. Objective measuring apparatus. Artificial voices." Technical report, International Telecommunication Union (ITU) (1988 - 1999).
13. International Telecommunication Union (ITU). "ITU-T recommendation p.830. series p: Telephone transmission quality. Methods for objective and subjective assessment of quality. Subjective performance assessment of telephone-band and wideband digital codecs." Technical report, International Telecommunication Union (ITU) (1996).

14. International Telecommunications Union (ITU). "ITU-T recommendation p.56. series p: Terminals and subjective and objective assessment methods. Objective measuring apparatus. Objective measurement of active speech level." Technical report, International Telecommunication Union (ITU) (1993-2011).
15. International Telecommunications Union (ITU). "ITU-T recommendation p.800. series p: Telephone transmission quality. Methods for objective and subjective assesment of quality. Methods for subjective determination of transmission quality." Technical report, International Telecommunication Union (ITU) (1996).
16. Dai, R. "A technical white paper on sage's psqm test." Technical report, Michigan Technological University (2000).
17. Voran, S. "Objective estimation of perceived speech quality. I. Development of the measuring normalizing block technique." IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 7(4):371–382 (1999).

Desarrollo de un prototipo de Estación Sísmica (ES-II)

Santiago, L.¹, Fiel, T.¹, Ramírez, L.²

¹UNAM, Instituto de Ingeniería, Coordinación de Electrónica.

²UNAM, Instituto de Ingeniería, Coordinación de Ingeniería Sismológica.

LSantiagoC@iingen.unam.mx; TFielM@iingen.unam.mx; LRamirezG@iingen.unam.mx

1. Resumen

En la actualidad, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) se hace uso de equipos de procedencia extranjera para la medición de las señales sísmicas. Dichos equipos son de un alto costo y desarrollados para cumplir con requerimientos generales. En este trabajo se presenta un equipo desarrollados para satisfacer los requerimientos de la Unidad de Instrumentación Sísmica (UIS), de la Coordinación de Ingeniería Sismológica del II-UNAM. El prototipo desarrollado utiliza como elemento sensor un acelerómetro Episensor modelo FBA ES-T de tres canales; las señales adquiridas son procesadas y enviadas a un puesto central, donde, con base en los datos enviados se genera una base de datos. Lo anterior permite que los datos sean consultados fuera de línea para su estudio posterior. El desarrollo de la tarjeta de adquisición y preprocesamiento de datos consiste de hardware y software propietario, el circuito impreso fue diseñado y enviado a fabricar en una empresa nacional. Actualmente se cuenta con dos estaciones operando a nivel laboratorio.

2. Introducción

El desarrollo de la estación Sísmica (ES-II) se origina por motivación del personal de las Coordinaciones de Electrónica e Ingeniería Sismológica del II-UNAM. La intención de este desarrollo es contar con un equipo diseñado, fabricado e integrado específicamente para las necesidades de la Coordinación de Sismología. Siendo un desarrollo propietario, el conocimiento cabal del hardware y software, permitirá hacer las adecuaciones necesarias.

2.1. Hardware de la ES-II

2.1.1. Acelerómetro

El acelerómetro es el Episensor modelo FBA ES-T de tres canales, figura 1. Es un acelerómetro de superficie, utilizado en aplicaciones de registro de terremotos y consta de tres módulos para registro de aceleración, uno por cada eje espacial. Cada uno de los ejes posee registros a escala completa entre $\pm 2.5g$ hasta $\pm 4g$ (valor configurable). En nuestra aplicación entre las diversas configuraciones que fueron necesarias, la de medición corresponde a $2G$.



Figura 1. Acelerómetro Episensor FBA ES-T.

2.1.2. Estación Sísmica

La ES-II está diseñada, construida e integrada con base en una tarjeta diseñada alrededor de un microcontrolador (SAM) y una Raspberry Pi 4. La tarjeta de Registro de Aceleraciones Sísmicas (RAS-II), figura 2, contiene convertidores analógico-digitales, lógica de control, interfaces de comunicación serial (para comunicación de datos y conexión a un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés)), un reloj de tiempo real (RTC, por sus siglas en inglés) y un puerto JTAG para acceder a las funciones de depuración/emulación y programación del microcontrolador. Para este conjunto se desarrolló el hardware y software correspondiente a su operación; en el caso de la tarjeta SAM, se diseñaron, fabricaron y probaron los circuitos impresos.

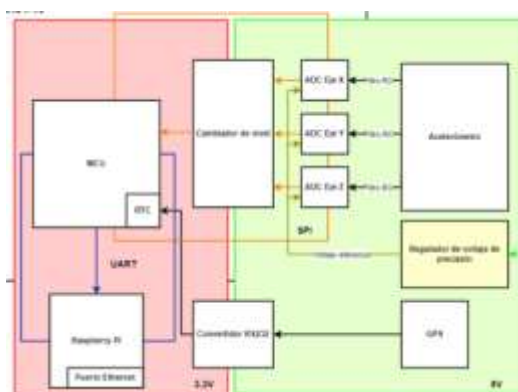


Figura 2. Diagrama de bloques del RAS-II.

En la figura 3 se muestra la tarjeta RAS-II desarrollada, sin armar y armada.



Figura 3. Tarjeta RAS-II desarrollada y ensamblada.

2.1.2. GPS (Global Positioning System)

Para poder fechar los datos sísmicos adquiridos, se hace uso de la información proporcionada por un receptor GPS (Sistema de Posicionamiento Global), también desarrollado en el II-UNAM, figura 4. Para la definición de los protocolos a utilizar se consultó el documento NMEA 0183. La comunicación serial asíncrona entre el receptor GPS y la tarjeta RAS-II se realiza a través del protocolo UART. Cabe comentar que como respaldo del fechado se utiliza un reloj de tiempo real.



Figura 4. Receptor GPS, desarrollado y ensamblado.

2.1.3. Raspberry Pi 4

Esta tarjeta se utiliza para el procesamiento y envío de la información colectada vía ethernet o WiFi. Al ser un dispositivo SoC (System on a Chip), y contar con un procesador de 4 núcleos y operar con 64 bits, los datos enviados cumplen con protocolos de la ingeniería sísmica y su uso facilita el envío de los datos a un puesto central. Los datos colectados en el puesto central son integrados a una base de datos para su posterior consulta. La comunicación serial asíncrona, entre la tarjeta RAS-II y la Raspberry Pi 4, se realiza a través del protocolo UART.

2.2. Software de la ES-II

La programación de la RAS-II se realizó en el entorno de desarrollo de Microchip Studio 7.0, el cual está especializado en la programación de dispositivos AVR y de la familia SAM de Atmel. De manera general, el software de la tarjeta RAS-II realiza los siguientes procesos:

1. Lectura de los convertidores analógico-digitales por medio de protocolo SPI.
2. Procesamiento de datos en el microcontrolador.
3. Envío de datos hacia Raspberry Pi por medio de protocolo UART.

El diagrama de flujo correspondiente se muestra en la figura 5.



Figura 5. Diagrama de lectura y envío de datos sísmicos.

Los datos enviados por el RAS-II son recibidos por la tarjeta Raspberry, procesados y enviados al puesto central.

La puesta en marcha del prototipo de estación sísmica se realizó mediante la integración de hardware y software y de realizar pruebas de operación. En la figura 6 se muestran dos estaciones sísmicas con sus respectivos GPSs.



Figura 6. Estaciones sísmicas con sus GPSs.

En la figura 7 se muestra una pantalla de la interacción de las tarjetas RAS-II y la Raspberry.

```
File Edit Tabs Help
rasp@raspberrypi: ~/Desktop/Desktop/data
rasp@raspberrypi:~/Desktop/Desktop/data$ python3 ver2.py
Iniciando periodo
/home/rasp/.local/lib/python3.8/site-packages/obspy/io/mseed/core.py:886: UserWarning: Detected non contiguous data array in b
read[0] data. Trying to fix array.
  warnings.warn(msg)
/home/rasp/.local/lib/python3.8/site-packages/obspy/io/mseed/readers.py:823: InternalMSEEDWarning: TL_RASPT_01_EN0_0: Packed 3
12 samples
  warnings.warn(w, InternalMSEEDWarning)
/home/rasp/.local/lib/python3.8/site-packages/obspy/io/mseed/readers.py:823: InternalMSEEDWarning: TL_RASPT_01_EN0_0: Packed 3
12 samples
  warnings.warn(w, InternalMSEEDWarning)
/home/rasp/.local/lib/python3.8/site-packages/obspy/io/mseed/readers.py:823: InternalMSEEDWarning: TL_RASPT_01_EN0_0: Packed 3
12 samples
  warnings.warn(w, InternalMSEEDWarning)
Archive miniseed/TME[2024-04-03T17:51:04.481].mseed generado
Archive miniseed/TM0[2024-04-03T17:51:04.481].mseed generado
Archive miniseed/TM2[2024-04-03T17:51:04.483].mseed generado
Archive miniseed/TME[2024-04-03T17:51:05.851].mseed generado
Archive miniseed/TM0[2024-04-03T17:51:05.851].mseed generado
Archive miniseed/TM2[2024-04-03T17:51:05.852].mseed generado
Archive miniseed/TME[2024-04-03T17:51:05.812].mseed generado
Archive miniseed/TM0[2024-04-03T17:51:05.812].mseed generado
Archive miniseed/TM2[2024-04-03T17:51:05.812].mseed generado
Archive miniseed/TME[2024-04-03T17:51:06.172].mseed generado
Archive miniseed/TM0[2024-04-03T17:51:06.172].mseed generado
Archive miniseed/TM2[2024-04-03T17:51:06.172].mseed generado
```

Figura 7. Lectura y envío de datos sísmicos.

En las siguientes figuras se muestran los resultados de las pruebas estáticas realizadas al acelerómetro.



Eje	Medición
X	23 [mV]
Y	6.4 [mV]
Z	-1.4 [mV]

Figura 8. Resultados de las mediciones con el acelerómetro en posición horizontal.



Eje	Medición
X	1.235 [V]
Y	-1.3 [mV]
Z	1.245 [V]



Eje	Medición
X	-1.265 [V]
Y	1.2 [mV]
Z	1.244 [V]

Figura 9. Resultados de las mediciones con el acelerómetro en posición $\pm 90^\circ$ con respecto al eje X, respectivamente.



Eje	Medición
X	6 [mV]
Y	1.249 [V]
Z	1.241 [V]



Eje	Medición
X	8 [mV]
Y	-1.223 [V]
Z	1.248 [V]

Figura 10. Resultados de las mediciones con el acelerómetro en posición $\pm 90^\circ$ con respecto al eje Y, respectivamente.



Eje	Medición
X	3 [mV]
Y	3.2 [mV]
Z	2.496 [V]

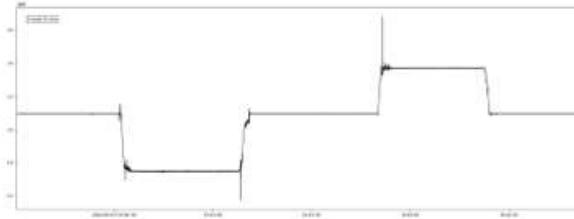
Figura 11. Resultados de las mediciones con el acelerómetro en posición 180° con respecto al eje Z. .

En la figura 12 se muestran los registros de calibración realizados con la estación sísmica. En ellas se pueden observar los resultados de las posiciones horizontal, $\pm 90^\circ$ para el eje X, $\pm 90^\circ$ para el eje Y, y 180° para el eje Z. Los valores aquí mostrados corresponden con las mediciones realizadas de manera estática pero son en valores enteros decimales, sin convertir a voltaje.

Pruebas Estación IP: 172.16.104.187 Sísmica el día 01-08-2024

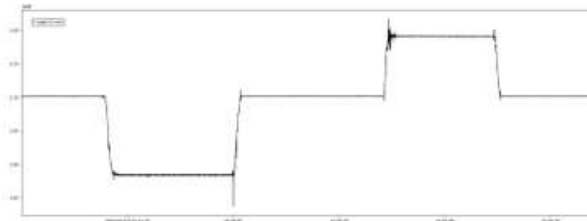
Eje X

```
# Set the time to noon on 2019-08-19
naive = datetime(2024, 8, 1, 13, 40, 00)
naive2 = datetime(2024, 8, 1, 13, 43, 10)
```



Eje y

```
# Set the time to noon on 2019-08-19
naive = datetime(2024, 8, 1, 13, 57, 00)
naive2 = datetime(2024, 8, 1, 14, 00, 10)
```



Eje z

```
# Set the time to noon on 2019-08-19
naive = datetime(2024, 8, 1, 14, 3, 00)
naive2 = datetime(2024, 8, 1, 14, 4, 10)
```

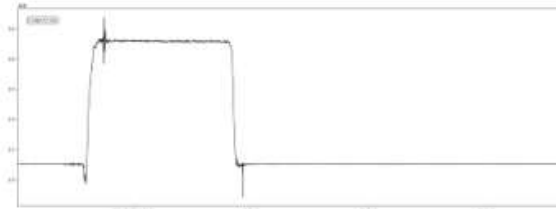


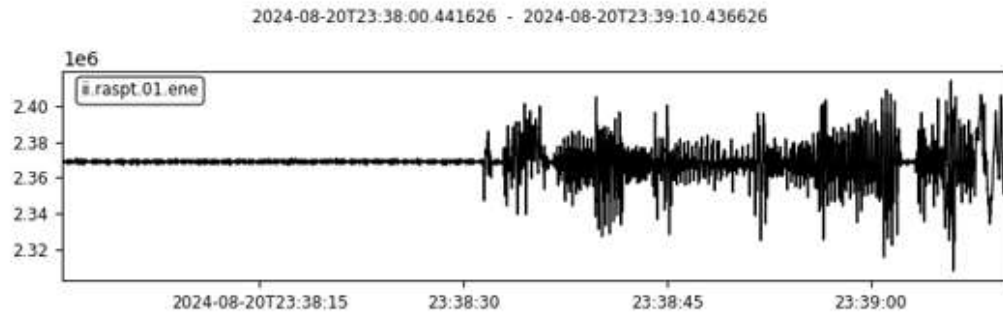
Figura 12. Registros de calibración del acelerómetro Episensor.

En la figura 13 se muestran los registros en pruebas reales con la estación sísmica, donde inicialmente se muestran en niveles bajos y después de algunos movimientos la respuesta del acelerómetro.

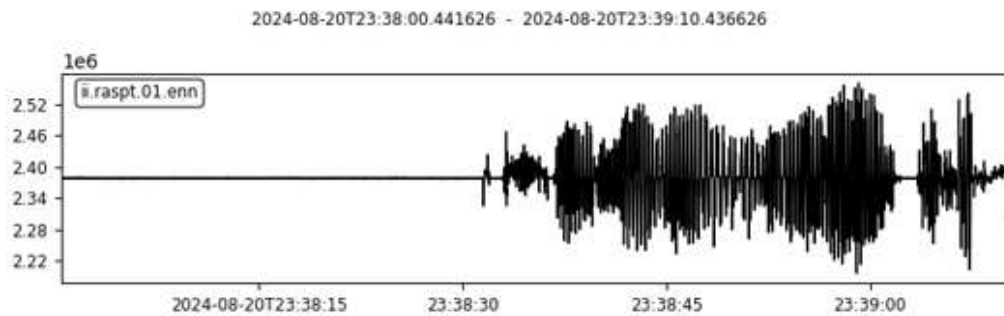
PRUEBAS DE CANALES DE LA RASPBERRY PI

"172.16.104.187"

- Canal X:



- Canal Y:



- Canal Z:

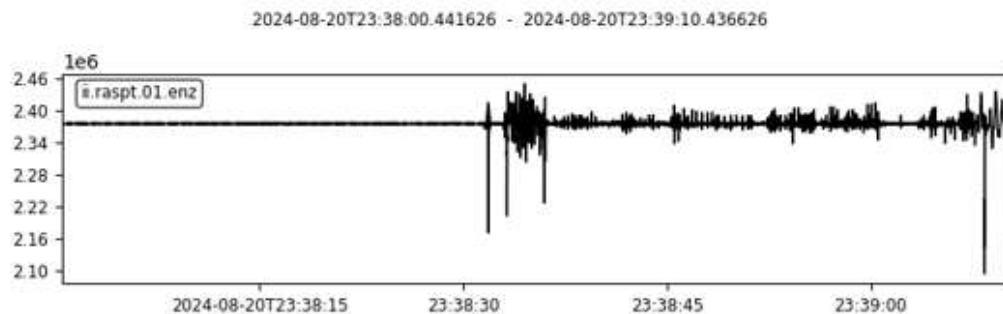


Figura 13. Registros de movimientos del acelerómetro Episensor en el laboratorio.

Finalmente en la figura 14 se muestra la estación central, donde se reciben los datos y se genera una base de datos.



Figura 14. Estación Central.

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos a nivel laboratorio han sido congruentes con lo esperado, ya que los datos que tuvimos en las pruebas estáticas coinciden por lo registrado con la Estación Sísmica RAS-II.

5. Conclusiones

Se cumplió con el objetivo establecido, ya que ahora contamos con un equipo desarrollado completamente en la Coordinación de Electrónica del Instituto de Ingeniería de la UNAM. A este equipo se le pueden hacer las adecuaciones que sean requeridas ya que los elementos de hardware y software están a nuestro alcance. Como siguiente paso

serán instalados en campo y de la realimentación de su operación se harán las adecuaciones necesarias.

5.1. Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) a través del proyecto PAPIIT IT104223 “Interacción suelo-ciudad: análisis e instrumentación para identificar el comportamiento y retroalimentación de estructuras en el movimiento del terreno durante sismos”, 2023.

6. Bibliografía

10. ATMEL.SAM4S Series. SMART ARM-Based Flash MCU. Atmel-11100K-ATARM-SAM4S-Datasheet_09-Jun-15.
11. ATMEL 42075-SAM4S Xplained Pro-User Guide-06/2015.
12. Application Note AT07337: SAM4 Real Time Clock (RTC). ASF Programmers Manual 42284A-MCU-05/2014.
13. User Guide Supplemental Information Episor Force Balance Accelerometer, Model FBA ES-T, Document 301923, Revision NC, July 2009.
14. User Guide Episor Force Balance Accelerometer, Model FBA ES-T, Document 301900, Revision D, October 2005.
15. National Marine Electronics Association, NMEA 0183, Standard for Interfacing Marine Electronics Devices, Version 3.01, January 1, 2002.

Breve estudio sobre expresiones teóricas conocidas para la eficiencia de plantas térmicas convertidoras de energía.

Ladino-Luna, D.¹, Paez-Hernández, R.T.², Chimal-Eguía, J.C.³, Pacheco-Páez, J.C.⁴

^{1,2}Física de Procesos Irreversibles, Depto. de Ciencias Básicas,

Universidad Autónoma Metropolitana-A, 02200 Ciudad de México, México;

³Laboratorio de Simulación y Modelado, Centro de Investigación en Computación

Instituto Politécnico Nacional, CP 07738, Ciudad de México, México;

⁴Depto. de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana-A,

02200 Ciudad de México, México;

¹dll@azc.uam.mx, ²phrt@azc.uam.mx, ³jchimale@ipn.mx, ⁴jcpacheco@azc.uam.mx

1. Resumen

Como se sabe, el primer estudio teórico sobre máquinas térmicas fue propuesto por S. Carnot mediante un modelo simplificado, esbozando lo que ahora conocemos como Segunda Ley de la Termodinámica, y estableciendo una manera de evaluar el desempeño de dicha máquina. Así, siguiendo la idea básica de simplicidad, en este manuscrito se discute la existencia de expresiones para la eficiencia teórica, a partir de los valores numéricos reportados de la eficiencia para diversas plantas térmicas convertidoras de energía, y de las expresiones de la eficiencia teórica obtenidas por diversas metodologías. Se incluyen gráficas comparativas de estos valores numéricos experimentales con las expresiones propuestas. El principal objetivo es mostrar que tales expresiones son más acordes con los resultados experimentales, y que implican una combinación de condiciones de desempeño tales mecanismos.

2. Introduction

La llamada termodinámica de tiempos finitos (TTF) ha sido aceptada como una alternativa para el análisis de ciclos termodinámicos. Inició su desarrollo con los trabajos pioneros de Novikov^[1] y Chambadal^[2]. Su formulación teórica, debida a Curzon y Ahlborn, fundamentó la validez de un nuevo límite de operación para las máquinas térmicas^[3] más acorde con los resultados numéricos reales, de varias centrales eléctricas, la eficiencia de Curzon-Ahlborn-Novikov-Chambadal (CAN), η_{CAN} , como,

$$\eta_{CAN} = 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}}, \quad (1)$$

donde las temperaturas de los almacenes caloríficos son T_C y T_H , cumpliéndose $T_C < T_H$, de un ciclo de Carnot modificado, llamado ciclo de Curzon y Ahlborn (CA), que representa la manera como se desempeña una máquina térmica en la que no existe equilibrio térmico entre el fluido de trabajo y sus almacenes de calor. Considerando una transferencia de calor a tiempo finito, dada por la ley de enfriamiento de Newton, se obtiene un modelo con potencia no nula. La Figura 1 muestra dicho ciclo, donde se observa el ciclo de Carnot cuando las temperaturas de trabajo T_{HW} y T_{CW} son como las de los almacenes T_C y T_H .

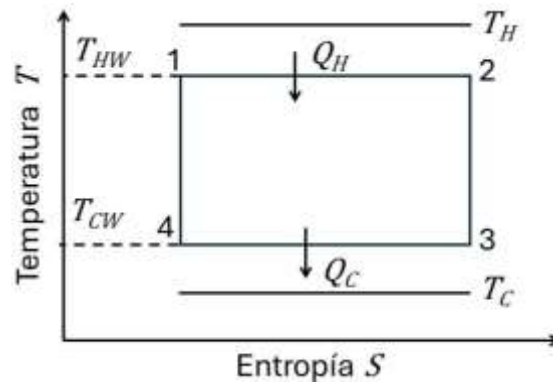


Figura 1. Ciclo modificado de Carnot (ciclo CA). Intercambios de calor: Q_H y Q_C , temperaturas de trabajo: T_{HW} y T_{CW} .

Es importante recordar que S. Carnot propuso un modelo simplificado de la máquina térmica, en las “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego” [4], donde se observa un principio básico y el germen de la Segunda Ley de la Termodinámica. Este principio es la consideración de la necesidad del restablecimiento del equilibrio térmico entre la máquina y sus alrededores, para la obtención de potencia. Mostró también que es necesario que la máquina ceda calor para poder obtener potencia. El modelo de máquina térmica concebido por Carnot es el de un cilindro encerrando un gas mediante un émbolo móvil, con alternados contactos con fuentes de calor fría y caliente. Celebrando los 200 años de las “Reflexiones”, es necesario reconocer que el modelo de la máquina de Carnot se utiliza continuamente para estudiar cualquier máquina térmica. Recientemente se ha abordado la importancia del ciclo de Carnot y su evolución como modelo [5-9], observando cómo los principios básicos mencionados anteriormente llevaron a postular una forma de evaluar el desempeño de cualquier máquina que trabaje con baños fríos y calientes alternadamente. La eficiencia, postulada por Carnot contiene la condición de que toda máquina térmica siempre tiene un desempeño menor al modelo ideal presentado por él, esto es que su eficiencia será siempre menor a la de dicho modelo, a saber,

$$\eta_C = 1 - \frac{T_C}{T_H}. \quad (2)$$

El ciclo de Carnot es un ciclo idealizado, reversible, y se representa también en un plano presión-volumen, introducido por Clapeyron. El análisis del ciclo de Carnot y la propia termodinámica avanzaron mucho con la introducción de este diagrama ^[5]. Considerando que el ciclo opera cuasiestáticamente para satisfacer la condición de reversibilidad, su producción de potencia, definida como trabajo dividido por el tiempo de desarrollo, desaparece. Pero las máquinas térmicas reales deben ejecutar un ciclo en un tiempo finito para generar una potencia finita. Así, la potencia también caracteriza el rendimiento de las máquinas térmicas, lo que fue sugerido en 1975 por Curzon y Ahlborn (CA) al proponer un modelo simple modificado del ciclo de Carnot (Figura 1), obteniendo un límite de operación más real, considerando la rapidez del intercambio de calor ^[8].

El desarrollo de la termodinámica de tiempos finitos, desde la publicación del artículo de Curzon y Ahlborn ^[3], se refiere a la eficiencia de una máquina de Carnot a máxima potencia, problema de fundamental importancia porque la eficiencia en el uso de la energía es uno de los objetivos más importantes para el futuro de la humanidad. Sin embargo, la eficiencia de cualquier máquina debe cumplir con el límite operativo obtenido por Carnot. La originalidad del trabajo de Curzon y Ahlborn reside en establecer la relación entre eficiencia y máxima potencia producida. Es importante señalar que en el marco de esta teoría, desde los primeros trabajos publicados después de del trabajo de Curzon y Ahlborn, e incluso los más recientes ^[10-20], se considera una función objetivo y la eficiencia del ciclo obtenida a partir de la maximización de dicha función. Se construye esta función de manera que dependa de algún parámetro controlable. Particularmente considerando la producción de entropía surgió el llamado criterio ecológico, introduciendo en el análisis la llamada función ecológica ^[15,16], definida como

$$E = P - T_C \sigma, \quad (3)$$

la cual relaciona la potencia producida durante el ciclo, $P = W_{TOT}/t$, considerando la menor producción de entropía posible, $\sigma = \Delta S/t$; donde W_{TOT} es el trabajo total producido por la máquina térmica modelada como el ciclo CA, ΔS es el cambio total de entropía debida a los intercambios de calor entre la máquina y sus almacenes de calor, y t es el tiempo total durante el desarrollo del ciclo. Así, para el ciclo de Carnot modificado mostrado en la Figura 1, la potencia obtenida de la máquina ha sido maximizada, y la producción de entropía ha sido minimizada. La función ecológica se puede considerar una potencia efectiva, obteniéndose en este caso la eficiencia ecológica η_E como,

$$\eta_E = 1 - \sqrt{\frac{1}{2}(\tau^2 + \tau)}, \quad (3)$$

donde $\tau = T_C/T_H$. Además, se observa la existencia de una semisuma de las eficiencias η_C y η_{CAN} , con valores cercanos a la eficiencia ecológica, η_{SE} , de manera que,

$$\eta_E \approx \frac{1}{2}(\eta_C + \eta_{CAN}) \equiv \eta_{SE}. \quad (4)$$

En la termodinámica de tiempo finito, se busca desarrollar modelos termodinámicos que conduzcan a niveles de funcionamiento de máquinas térmicas más realistas que los proporcionados por la termodinámica clásica de equilibrio. Lo que se logra teniendo en cuenta las fuentes productoras de irreversibilidad, y representarse mediante expresiones de eficiencia que combinen diferentes modos de operación, definida como la relación entre el trabajo total realizado por la máquina y el calor absorbido por ella, es decir

$$\eta = \frac{W_{TOT}}{Q_{abs}}. \quad (5)$$

En este trabajo analizamos los valores experimentales de la eficiencia para algunas plantas térmicas, y suponiendo su modo de operación como el ciclo CA, proponemos combinar estas expresiones obtenidas por diversas metodologías como semi-suma de ellas, con el fin de obtener expresiones de la eficiencia más acordes con los valores experimentales conocidos. Se comenta alguna posible interpretación de estos resultados y se muestra gráficamente esta situación. Agregamos al final de este manuscrito comentarios y conclusiones sobre estos resultados.

3. Condiciones experimentales

Consideramos ahora un análisis comparativo de la eficiencia para diversas plantas convertidoras de energía, tablas de datos, mostrados en la literatura^[1,19-24]. La Tabla1 muestra los valores de la eficiencia reportados, que usaremos con el propósito de realizar una comparación de los resultados teóricos con los valores de las eficiencias medidas (experimentales). Para obtener una expresión analítica lo más simple posible, se considera el desempeño de las plantas semejante al de una máquina térmica que cumpla el ciclo CA. Aparte de la eficiencia de Carnot y CAN se muestran los valores obtenidos con la eficiencia ecológica. Es fácil observar que para las plantas diseñadas después de 1980 en su mayoría su eficiencia está mejor representada por la eficiencia ecológica, y

para las plantas diseñadas antes de 1980 su eficiencia está mejor representada por la eficiencia de Curzon-Ahlborn-Novikov-Chambadal.

Tabla 1. Eficiencias para plantas convertidoras de energía modeladas como ciclo CAN

Planta de potencia	T_C/T_H	η_C	η_{CAN}	η_E	η_{obs}
West Turrock, conventional steam plant by burning coal (U.K.) 1962	298/838	0.644	0.404	0.509	0.360
Lardarello, geothermal steam plant, (Italy) 1964	353/523	0.325	0.178	0.248	0.160
Central steam power plant (U.K.), 1936-1940	298/698	0.573	0.346	0.448	0.280
Steam power plant (USA) 1956	298/923	0.677	0.432	0.554	0.400
Combined cycle plant, steam and mercury (USA) 1949	298/783	0.619	0.383	0.487	0.340
Doel 4, nuclear power plant (Belgium) 1985	283/566	0.500	0.293	0.387	0.350
Almaraz II, nuclear plant, overloaded reactor (Spain) 1983	290/600	0.517	0.305	0.401	0.345
Sizewell B, plant, overloaded reactor (U.K.), 1995	288/581	0.504	0.296	0.391	0.363
Cofrentes, nuclear power plant (Spain) 1984	289/562	0.486	0.283	0.376	0.340
Nuclear power plant, advanced gas cooled reactor, Heysham (U. K.) 1988	288/727	0.604	0.370	0.474	0.400

3.1 Análisis con la ley de enfriamiento de Newton

En diversas publicaciones posteriores al trabajo pionero de Curzon y Ahlborn se estudió el ciclo mostrado en la Figura 1, considerando la transferencia de calor con la ley de enfriamiento de Newton [10-15], así como en el trabajo de Curzon y Ahlborn. En particular en [17] se propuso un modelo de máquina térmica compuesto por un émbolo móvil dentro de un cilindro en contacto térmico con una fuente de calor y un disipador de calor, y se encontró que la eficiencia CAN corresponde al caso en que la pérdida de trabajo útil se produce cuando se considera solo una forma de pérdida de calor: expulsión por presión. También mostró que la eficiencia a máxima potencia tiene un valor entre la eficiencia considerando solo los efectos de fricción y la eficiencia CAN, esto es,

$$\frac{1}{2}\eta_C < \eta_{Pm\acute{a}x} < \eta_{CAN}. \quad (6)$$

Esta ecuaci3n sugiere la posibilidad de proponer una relaci3n con valor intermedio usando los valores extremos de la desigualdad. Sea $\eta_{Pm\acute{a}x}^*$ el valor intermedio sugerido por (6). Entonces tendremos la expresi3n

$$\eta_{Pmax} = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}\eta_C + \eta_{CAN}). \quad (7)$$

Esto sugiere un modo de operaci3n en donde la transferencia de calor se realiza como la ley de enfriamiento de Newton, y se encuentra que los valores obtenidos para esas plantas usando (7) son m1s cercanos a los valores experimentales reportados, como puede observarse en la Figura 2, y haciendo el c1lculo num3rico para cada planta.

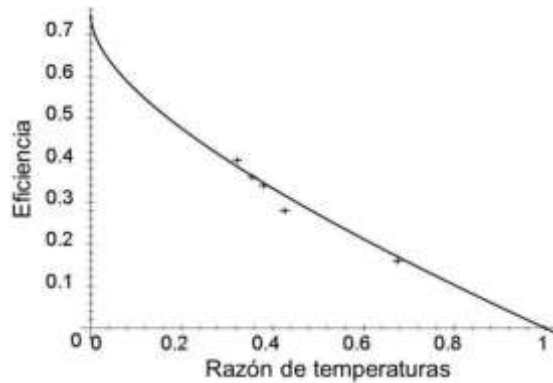


Figura. 2. Comparaci3n entre valores experimentales de la eficiencia (señalados con +) y valores obtenidos con (7), curva obtenida.

Siguiendo esta l3nea de consideraciones, para las plantas diseñadas despu3s de 1980 su eficiencia est1 representada por la eficiencia ecol3gica, Ec. (6), pero tal vez podr3a mejorarse el acercamiento de los datos experimentales con alguna expresi3n que contenga la consideraci3n del t3rmino proporcional a la producci3n de entrop3a. Obs3rvese que en la Tabla 1, en general se cumple la desigualdad

$$\eta_{CAN} < \eta_{obs} < \eta_E, \quad (8)$$

lo que nos lleva a considerar la posibilidad de una expresión semejante a (7), pero para las eficiencias CAN y ecológica. Sea esta expresión la semisuma de estas eficiencias, que llamaremos η_{EN} . En la Figura 3 presentamos los puntos correspondientes a los valores de η_{obs} y la curva generada por la expresión de la semisuma considerada,

$$\eta_{obs} \approx \frac{1}{2}(\eta_{CAN} + \eta_E) = \eta_{EN}. \quad (9)$$

La expresión obtenida indica que estamos tomando en cuenta la minimización de la producción de entropía y el tiempo de generación de ella, además la consideración de los tiempos finitos en los procesos de intercambio de calor.

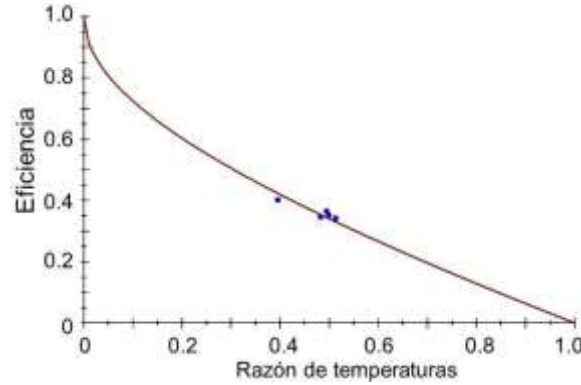


Figura. 2. Comparación entre valores experimentales de la eficiencia (señalados con puntos) y valores obtenidos con (9), curva obtenida.

3.2 Análisis con la ley de Dulong y Petit

Considérese ahora una ley de transferencia de calor como no lineal. Es necesario considerar una ley de transferencia de calor de esta naturaleza para incorporar las diferentes formas de transferencia de calor entre medios con diferente temperatura, y no solo el que indica la ley de enfriamiento de Newton. Así, para un tiempo finito se tiene,

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha(T_0 - T)^k, \quad (10)$$

El parámetro k cumple $1.1 \leq k \leq 1.6$; siendo $\frac{dQ}{dt}$ la razón de transferencia de calor, α es la conductancia térmica, T_0 es la temperatura de los alrededores, T es la temperatura del cuerpo. El caso particular es la ley de transferencia de calor de Dulong y Petit, donde $k = 5/4$, propuesto por Dulong

y Petit, que cumple $1.1 \leq k \leq 1.6$ ^[25,26]. Se ha encontrado que, para las centrales eléctricas diseñadas antes de 1980, se obtienen valores de eficiencia más cercanos a los valores experimentales con esta ley de transferencia, en el régimen de máxima potencia de salida, se ha obtenido una expresión analítica aproximada ^[23] al utilizar el procedimiento de Gutkowicz, Procaccia y Ross ^[6]; y utilizando un enfoque variacional ^[21,22]. Las expresiones halladas son, respectivamente

$$\eta_{OPDP} = 1 - \frac{1}{10} (1 - \tau + \sqrt{\tau^2 + 98\tau + 1}), \quad (11)$$

$$\eta_{MP}^{(\alpha)} = 1 + \frac{\tau}{8} - \frac{1}{8} \sqrt{\tau(80 + \tau)}. \quad (12)$$

Estas expresiones cumplen una desigualdad semejante a (6) y (8), de tal manera que se puede considerar una expression intermedia, que llamaremos η_{SDP} , como puede observarse en la Tabla 2, esto es

$$\eta_{OPDP} \leq \eta_{obs} \leq \eta_{MP}^{(\alpha)}, \quad (13)$$

$$\eta_{SDP} \equiv \frac{1}{2} (\eta_{OPDP} + \eta_{MP}^{(\alpha)}) \approx \eta_{obs}. \quad (14)$$

Tabla 2. Comparación numérica para (11), (12), and (14)

Planta de potencia	η_{SDP}	T_C/T_H	$\eta_{MP}^{(\alpha)}$	η_{OPDP}	η_{SDP}	η_{obs}
West Turrock, conventional steam plant by burning coal (U.K.) 1962		298/838	0.376	0.336	0.356	0.360
Lardarello, geothermal steam plant, (Italy) 1964		353/523	0.162	0.145	0.153	0.160
Central steam power plant (U.K.), 1936-1940		298/698	0.404	0.286	0.345	0.400
Steam power plant (USA) 1956		298/923	0.356	0.360	0.358	0.340
Combined cycle plant, steam and mercury (USA) 1949		298/783	0.321	0.318	0.319	0.280

Además en la Figura 3 observamos la cercanía de los valores experimentales reportados (señalados con puntos) y los valores que se obtienen a partir de (14), encontrados sobre la curva para los mismos valores de la razón de temperaturas reportadas, T_c/T_H .

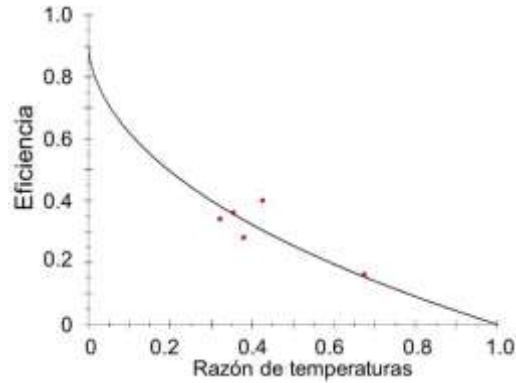


Figura. 3. Comparación entre valores experimentales de la eficiencia (señalados con puntos) y valores obtenidos con (14), curva obtenida.

Como ya hemos comentado, la eficiencia ecológica tiene valores cercanos a los valores experimentales para plantas diseñadas después de 1980, en tanto que resultan muy lejanos para plantas diseñadas antes de 1980. Así, para considerar otras formas de conducción de calor aparte de la expresada con la ley de enfriamiento de Newton, como ya se ha hecho, ahora podemos plantear la posibilidad de relaciones semejantes a las anteriores, pero considerando el criterio ecológico. Se ha obtenido, siguiendo la metodología mostrada en [4], la expresión aproximada para la eficiencia ^[24],

$$\eta_{OEDP} = 1 - \frac{1}{36}(1 - \tau + \sqrt{649\tau^2 + 646\tau + 1}), \quad (15)$$

y usando una metodología con cálculo variacional^[21,22],

$$\eta_{ME}^{(\alpha)} = 1 + \frac{\tau}{8} - \frac{1}{8}\sqrt{\tau(40 + 41\tau)}. \quad (16)$$

Estas expresiones cumplen con el criterio ecológico, esto es,

$$\eta_{OEDP} \approx \frac{1}{2}(\eta_C + \eta_{OPDP}) \text{ y } \eta_{ME}^{(\alpha)} \approx \frac{1}{2}(\eta_C + \eta_{MP}^{(\alpha)}), \quad (17)$$

además se encuentra que,

$$\eta_{obs} \leq \eta_{OEDP} \leq \eta_{ME}^{(\alpha)}. \quad (16)$$

El resultado es que, como muestra la Tabla 3, η_{OEDP} en efecto resulta más cercana a los valores reportados para las plantas posteriores a 1980.

Tabla 3. Comparación entre $\eta_{EP}^{(\alpha)}$, η_{OEDP} , y los valores reportados de plantas diseñadas después de 1980

Planta de potencia	T_2/T_1	η_{OEDP}	$\eta_{ME}^{(\alpha)}$	η_{obs}
Doel 4, nuclear power plant (Belgium) 1985	283/566	0.3735	0.375	0.350
Almaraz II, nuclear plant, overloaded reactor (Spain) 1983	290/600	0.387	0.388	0.345
Sizewell B, plant, overloaded reactor (U.K.), 1995	288/581	0.377	0.378	0.363
Cofrentes, nuclear power plant (Spain) 1984	289/562	0.362	0.364	0.340
Nuclear power plant, advanced gas cooled reactor, Heysham (U. K.) 1988	288/727	0.457	0.459	0.400

4. Resultados y discusión

Se ha encontrado que una combinación de expresiones de la eficiencia, en los regímenes de operación de una máquina térmica, modelada como un ciclo de Carnot modificado, permite modelar el desempeño de las plantas de potencia, en el sentido de que cada expresión obtenida indica la manera como es necesario considerar el proceso de intercambio de calor entre la máquina y sus alrededores. Es conveniente señalar que al observar las diferentes maneras de obtener las eficiencias mostradas, en forma de semisuma, comparando tanto gráficamente como numéricamente, entre ellas y respecto de los valores experimentales, independientemente de la forma para la transferencia de calor, se cumple la propiedad

$$\eta_E \approx \frac{1}{2} [(\eta(\text{Carnot}) + \eta(\text{Curzon} - \text{Ahlborn} - \text{Novikov}))].$$

Esto es, el llamado criterio ecológico aparece como un principio básico en cuanto al análisis del desempeño de cualquier máquina térmica. La propiedad de semisuma aparece como un atributo general de las máquinas térmicas, en el sentido de que es esa la manera de operar cuando no se toman en cuenta otros efectos. Pero, si el objetivo es obtener expresiones analíticas con valores muy cercanos a los valores experimentales, es necesario construir expresiones, también en forma de semisuma, que involucren a las expresiones obtenidas dependiendo del régimen de operación, considerando la forma de transferencia de calor. Esto es, considerando que las máquinas absorben y desechan calor en todas las formas posibles, (radiación convección, conducción y otras), éstas deben aparecer en las expresiones de la eficiencia que finalmente den valores muy cercanos a los valores experimentales. Estudios muy recientes muestran la validez del comentario previo [27-30].

5. Conclusiones

Como se puede observar, una combinación de expresiones de la eficiencia en cualquiera de los regímenes de operación de una máquina térmica, modelada como un ciclo tipo Carnot modificado, considerando diferentes metodologías, permite modelar el desempeño de las centrales eléctricas, en el sentido de que cada una de las eficiencias obtenidas indica la forma en que es necesario considerar el proceso de intercambio de calor entre la propia máquina y sus alrededores. Sin embargo, es necesario señalar que el presente trabajo no es solo un ejercicio de cálculo, como podría verse superficialmente, es esencialmente un estudio de como cada una de las diferentes formas de obtener la eficiencia muestra que implícitamente se está considerando la mayor cantidad posible de efectos sobre el sistema, que deben tomarse en cuenta cuando se diseña cualquier máquina térmica.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Universidad Autónoma Metropolitana, y parcialmente por el Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT, México). JCCE agradece a COFAA-IPN y EDI-IPN.

6. Bibliografía

1. Novikov, I.I., The Efficiency of Atomic Power Stations (A Review), J. Nuclear Energy II 7, 125-128 (1958).
2. Chambadal, P., Les Centrales Nucleares. Francia, Armand Colin, 1957.
3. Curzon, F.L., Ahlborn, B., Efficiency of a Carnot Engine at Maximum Power Output, Am. J. Phys. 43, 22-24 (1975).
4. Carnot, S. Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego. Traducción del original en francés, México, Instituto politécnico Nacional, 1998.
5. Feidt, M., The History and Perspectives of Efficiency at Maximum Power of the Carnot Engine, Entropy 19, 369 (2017). doi:10.3390/e19070369
6. Feidt, M., Costea, M., Progress in Carnot and Chambadal Modeling of Thermomechanical Engine by Considering Entropy Production and Heat Transfer Entropy, Entropy 21, 1232 (2019). doi:10.3390/e21121232
7. Feidt, M., Costea, M., A New Step in the Optimization of the Chambadal Model of the Carnot Engine, Entropy 24, 84 (2019). doi.org/10.3390/e24010084
8. Izumida, Y., Non-unique detailed constructions of Curzon-Ahlborn cycle on thermodynamic plane, arXiv:2403.10743v1 (2024).
9. Blaisea, M., Feid, M., Maillet, D., Influence of the working fluid properties on optimized power of an irreversible finite dimensions Carnot engine, Energy Conversion and Management 163, 444-456 (2018).
10. Gutkowics-Krusin, D., Procaccia, I., Ross, J, On the Efficiency of Rate Processes. Power and Efficiency of Heat Engines, J. Chem. Phys. 69, 3898-3906 (1978).
11. Rubin, M., Optimal Configuration of a Class of Irreversible Heat Engines. I, Phys. Rev. A 19, 1272-1276 (1979).
12. Rubin, M., Optimal Configuration of a Class of Irreversible Heat Engines. II, Phys. Rev. A 19, 1277-1289 (1979).
13. Salamon, P., Nitzan, A., Andresen, B., Berry, R.S., Minimum Entropy Production and the Optimization of Heat Engines, Phys. Rev. A 21: 2115-2129 (1980).
14. Torres, J.L., Minimal Rate Entropy Production as a Criterion of Merit for Thermal Engines, Rev. Mex. Fís. 34: 18-24 (1988).
15. Angulo-Brown, F., An Ecological Optimization Criterion for Finite-Time heat Engines, J. Appl. Phys. 69, 7465-7469 (1991).
16. Angulo-Brown, F., Páez-Hernández, R.T., Endoreversible Thermal Cycle with Nonlinear Heat Transfer Law, J. Appl. Phys. 74, 2216-2219 (1993).
17. Rebham E., Efficiency of nonideal Carnot engines with friction and heat losses, Am. J. Phys. 70, 1143-1149 (2002).
18. Kaushik, S.C., S.K. Tyagi, Finite time thermodynamic analysis of an irreversible regenerative closed cycle Brayton heat engine, Int. J. of Solar Energy 22, 141-151 (2002).
19. Arias-Hernández, Angulo-Brown, F., A general property of endorreversible thermal engine, J. Appl. Phys. 81, 2973-2979 (1997).
20. Ladino-Luna, D., de la Selva, S.M, The ecological efficiency of a thermal finite time engine, Rev. Mex. Fís. 46, 52-56 (2000).
21. Arias-Hernández, L.A., Ares, G., Angulo-Brown, F., On some nonendoreversible engine models with nonlinear heat transfer law, Open Sys. & Information Dyn. 10, 351-375 (2003).

22. Arias-Hernández, L.A., Ares, G., Angulo-Brown, F., A variational ecological-type optimization of some thermal-engine models, , Open Sys. & Information Dyn. 11, 123-138 (2004).
23. Ladino-Luna, D., Efficiency of a Curzon and Ahlborn Engine with Dulong-Petit Heat Transfer Law, Rev. Mex. Fís. 48, 87-91 (2003).
24. Ladino-Luna, D., Approximate Ecological Efficiency with a Non-Linear Heat Transfer, J. of the Energy Institute 81, 114-117 (2008).
25. Taylor, L.W., Manual of advanced undergraduate experiments in physics, pág. 115. U K, Addison-Wesley, 1959.
26. Nelson, M. y P. Parker, Advanced level physics, pág. 194. U K, Heinemann 4th. Ed., 1977.
27. R D Kaufman and E Sheldon† Studies of unconventional heat engine design, operation and efficiency: four-step quasi-Carnot cycles with a linear P/V transitionJ. Phys. D: Appl. Phys. 30, 2853-2864 (1997).
28. Julio Juan Fernández Power and efficient power optimization of one-qubit Novikov quantum heat engines with an external dissipative heat leak, J. Non-Equilib. Thermodyn, (2024). <https://doi.org/10.1515/jnet-2023-0118>.
29. A. Calvo Hernández, J.M.M. Roco, and A. Medina, N. Sánchez-Salas, Heat engines and the Curzon-Ahlborn efficiency, Rev. Mex. de Fís. 60, 384–389 (2014).
30. Blaisea, M., Feidt, M., Maillet, D., Influence of the working fluid properties on optimized power of an irreversible finite dimensions Carnot engine, Energy Conversion and Management 163, 444–456 (2018).

Modelado y Simulación de la propagación de una señal dentro de una guía-onda

Calva V.G¹, Prieto R¹, Herrera A¹, Padrón A¹, Pacchiano M²

¹ Grupo Académico de Modelado y Simulación de Procesos.
Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología.
Universidad Nacional Autónoma de México.
Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria.
AP 70-186. CP 04510. CdMx. México.

² Universidad Anáhuac del sur, Av. De las Torres 131.
Álvaro Obregón. Olivar de Los Padres. C.P. 01780,
CdMx. México

gerardo.calva@icat.unam.mx; rafael.prieto@icat.unam.mx;
alberto.herrera@icat.unam.mx; alejandro.padron@icat.unam.mx; mpg01@yahoo.com

1. Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de desarrollar un modelo matemático que permite simular el comportamiento que presenta una sección de guía-onda con las señales que se propagan en su interior. Teniendo como intervalo inicial y de prueba, la banda de frecuencias que comprenden las longitudes de onda de: 3.6 cm a 2.41 cm, manteniendo una impedancia característica de 50 Ω . Los resultados de las simulaciones presentan respuestas esperadas, tanto en la simulación en la que se hace variar la longitud de onda de la señal para la guía-onda que está establecida para esas longitudes de onda, como en la simulación en la que se cambia la dimensión de la guía-onda y se utilizan las frecuencias propuestas inicialmente.

2. Introducción

Las líneas de transmisión son un buen medio para llevar energía o información relevante entre dos o más puntos. La anterior es la definición más amplia que se puede otorgar a un sistema de alambres para lograr una transmisión considerada como aceptable. Aun cuando puede transmitirse casi cualquier tipo de señales, es conveniente tener en cuenta las características de lo que es la línea de transmisión, o medio de transmisión ^[1]. Lo anterior con la finalidad de optimizar el arreglo transmisor-medio de propagación-receptor.

Al mencionar un sistema de transmisión se consideran dos tipos de líneas de transmisión. Los cables paralelos o par balanceado, y el cable coaxial o par no balanceado.

El par balanceado es común encontrarlo en sistemas cuya frecuencia de operación está bien definida y es mayormente utilizado en la recepción de señales, aun cuando también es posible su uso con transmisores en intervalos que comprenden la banda de alta frecuencia (HF por sus siglas en inglés). Por otro lado se mencionó al par no balanceado, el cual es muy común en conexiones de transmisores con su antena. Estas líneas de transmisión se pueden utilizar en sistemas que se encuentren operando en la banda de frecuencias de ultra alta frecuencia (UHF por sus siglas en inglés) y en algunas bandas de microondas, con la finalidad de evitar una radiación no deseada.

Cada uno de los sistemas de cables se puede identificar por su número de Join Army-Navy^[1] (JAN por sus siglas en inglés). Resulta más común referirse a sus números cuando se realiza un diseño e implementación de sistemas, que a sus márgenes de operación en frecuencia. Lo mismo sucede con los dispositivos conocidos como guía-onda. Cualquier tubo, tubería, con cualquier tipo de sección transversal puede ser

utilizado como guía-onda. Claro está que es bueno tener una sección transversal conocida estable, que pueda ser circular o rectangular, aunque para casos especiales se tengan secciones totalmente diferentes a las mencionadas.

Tratándose de guía-onda es muy común encontrarlas en formato rectangular su forma permite plantear de mejor manera, cómo es la propagación de las señales y por ello intentar que su diseño sea menos complicado.

En el diseño de sistemas, al llegar al tipo de sección de guía-onda que se va a utilizar se define sólo el número que tiene asignado por convención, y que es el que se corresponde con las frecuencias a utilizar. Y es aquí donde existen quienes cuestionan, por qué utilizar esa guía-onda y son difíciles de convencer, hasta llegan a cuestionar los anchos de banda asignados a cada perfil metálico inclusive, exigen analizar el comportamiento de las señales a utilizar con esa guía-onda. A grado tal, que se habla de poder simular su uso, tal como se hace con longitudes de onda que comprenden los 1530 nm. Se mencionan estas longitudes de onda porque son márgenes de operación de algunos simuladores comerciales, los que requieren de una licencia de operación.

Por todo lo anterior se propuso generar un modelo matemático propio, con el cual sea posible simular el comportamiento, o interacción de la señal a transmitir con la sección de guía-onda.

El modelo se diseñó partiendo del arreglo sencillo compuesto por un transmisor y un receptor acoplados, a la guía-onda. Ver figura1.

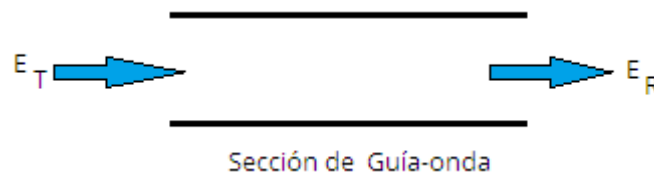


Figura 1. Arreglo entre el transmisor la guía-onda y el receptor.

En la figura 1, se representa lo que se tomaría como ejemplo para realizar o diseñar el modelado del comportamiento entre la energía aplicada a la guía-onda y la propia guía.

Para empezar, se partió de suponer una guía-onda rectangular, esto por ser un perfil muy utilizado a esas frecuencias. Además, se desarrolló el modelo matemático considerando una de las bandas de frecuencia más utilizada en laboratorios de electromagnetismo a nivel educativo, así como a nivel de investigación. Su desempeño está documentado a estas frecuencias por aplicaciones desarrolladas con antelación por diferentes investigadores tanto en enseñanza como en investigación, hecho que se ha reiterado en varias ocasiones ^{[1], [2], [3], [4]}. El intervalo con el que primero se desarrolló el modelo matemático comprende las longitudes de onda de: 3.6 cm a 2.41 cm. Se obtuvo

un modelo sencillo, que involucra las dimensiones de la sección de guía-onda, y por lo mismo las longitudes de onda de las señales a utilizar. En este modelo matemático es posible definir de ser requerido, los ángulos de incidencia de las señales que se propagan por las paredes de la guía-onda.

El modelo matemático diseñado es una relación funcional entre variables, que en una primera aproximación dio los resultados esperados, como puede comprobarse al analizar el tipo de respuesta obtenido, con el que debe tener según se puede encontrar en cualquier libro de texto en referencia con el tema ^[5], ^[6]. Las respuestas permitieron un primer ajuste al modelo, con lo que se posibilitó la generación de las gráficas aquí expuestas.

La simulación del modelo arroja las gráficas de comportamiento con base en sus longitudes de onda contra el número de modos de transmisión. Estos primeros resultados concuerdan con lo esperado del modelo matemático, como se aprecia en la sección de: Resultados y discusión.

3. Condiciones experimentales

3.1 Conceptos de la Guía-onda

El medio más común por el cual se logra la transferencia segura de la energía para ciertas longitudes de onda es la llamada guía-onda. Una guía-onda es una cavidad de material conductor rectangular o circular ^[5] Para una guía-onda rectangular se tendrán dos medidas una es su altura (b), y la otra el ancho de la guía (a) como se aprecia en el dibujo de la figura 2.

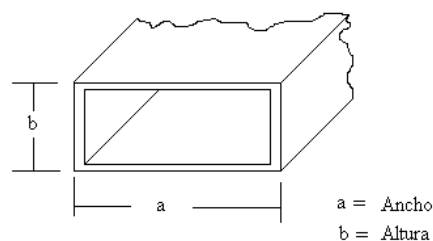


Figura 2. Dibujo de una guía-onda rectangular

La energía de las microondas es transportada a través de la guía por la reflexión a lo largo de sus paredes internas. Esto es posible si las dimensiones de la guía-onda son ligeramente mayores que un medio de la longitud de la onda del voltaje aplicado ^[7]. De aquí se tiene que el tamaño de la guía-onda está directamente relacionado con la

frecuencia [8]. Las guía-onda son superiores a las líneas de transmisión convencionales, en términos de la atenuación por unidad de longitud, que experimenta la onda que se propaga a través de ella a esas frecuencias. Por supuesto tratándose de frecuencias relativamente altas, como las microondas. Las guía-onda están normalmente hechas de cobre, aluminio o de latón además de encontrarlas en las más diversas formas y longitudes que se pueda imaginar. Se tienen guía-onda con un cierto ángulo de inclinación o curvadas para hacer un cambio de polaridad, y algunas incluso son flexibles. Las frecuencias que ocupan las microondas, están situadas al extremo superior de las radio frecuencias y al principio de las frecuencias ópticas [7]. De hecho, las frecuencias consideradas como microondas son únicas en su comportamiento, ya que estas pequeñas frecuencias son ondas de radio que tienden a actuar como ondas de luz [8].

Las preguntas que pueden surgir son: ¿Que es una guía-onda? ¿Por qué Utilizar una guía-onda? Esto se puede apreciar de manera muy sencilla. Al apuntar un haz de luz hacia la abertura de una sección rectangular de guía-onda, la energía emergerá en el extremo opuesto de la sección utilizada. Por lo que, se puede conceptualizar por qué las guía-onda pueden ser utilizadas para conducir la energía en las frecuencias conocidas como microondas. De lo anterior, podemos asegurar que es conveniente utilizar las teorías de la óptica al tratar a las señales generadas a esas frecuencias. Las guía-onda utilizadas en telecomunicaciones en laboratorios de enseñanza y de investigación de la teoría electromagnética, pueden ser circulares o rectangulares.

En el caso de las guía-onda rectangulares, el ancho debe ser ligeramente mayor que la mitad de la longitud de onda de la señal más baja que se va a transmitir, la que será la frecuencia de corte f_{co} [5].

3.2 Modos de transmisión en una guía-onda.

El modo de transmisión describe el patrón de energía electromagnética que se propaga por el interior de la guía-onda. En el modo eléctrico transversal (TE), el campo eléctrico es transversal (cruza) la dirección de propagación, y el campo magnético es paralelo a la dirección de propagación [5]. En la figura 3 se ilustra de forma combinada, cómo es que se distribuyen los campos dentro de la guía-onda.

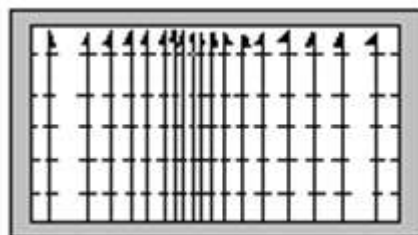


Figura 3. Patrón del modo eléctrico transversal

Impedancia en una guía-onda. Como en la mayoría de los sistemas electrónicos y de comunicaciones, es indispensable conocer cuál es la impedancia del sistema antes de energizar dicho sistema. Si lo que se requiere es transferir energía de un extremo a otro, es necesario que el medio de propagación tenga la misma impedancia del emisor. Una impedancia acoplada implica que tanto el emisor como el medio, y el sistema de recepción, deberán tener la misma impedancia característica para así, asegurar que en lo posible, se dé un máximo en la transferencia de la energía del emisor al receptor [9]. Al tener todas las partes que intervienen en el sistema de transmisión recepción con la misma impedancia característica (o muy cercanas unas a otras) la potencia será transferida a la carga sin reflexiones evitando así, pérdidas en su recorrido. La pregunta que surge ¿De qué dependerá que se tenga en el diseño de una sección de guía-onda la misma impedancia del emisor? Sencillamente, la impedancia en una guía-onda va a depender de las medidas que ésta tenga.

Normalmente se diseñan y fabrican perfiles de diferentes materiales, y las medidas de ellos las definen los fabricantes, considerando a las que pueden ser las de mayor demanda. De igual manera, con fines prácticos se agrupan ciertas longitudes de onda y se busca hacer coincidir a estas, con las dimensiones de los perfiles comerciales, lo que facilita su uso. Sin embargo, existen opiniones acerca de por qué se utiliza tal o cual perfil en la aplicación que se está reportando y cuál va a ser su tipo de respuesta. Todo se respondería consultando los libros de texto aunque, algo útil de estas críticas puede resultar y tan es así, que por ello es que se propuso modelar y simular el comportamiento que se da entre la dupla señal electromagnética, y la guía-onda.

3.3 Modelado del funcionamiento de una sección de guía-onda

Para el modelado del comportamiento de la sección de guía-onda se tienen en cuenta sus características de dimensiones tanto exteriores como interiores. Las dimensiones de la guía-onda son fundamentales para definir su impedancia y márgenes en frecuencia en los que es recomendable su uso, ya que una guía-onda podrá ser utilizada fuera de su intervalo, aun cuando su funcionamiento no sea tan eficiente como para el que fue diseñada. Tal como es el caso de las frecuencias superiores del intervalo, para las que puede seguir funcionando la guía-onda pero con un resultado poco eficiente. Lo mismo sucede con la potencia. Con base en los datos de una guía-onda, sus dimensiones de ancho y altura de la sección, así como las longitudes de onda de las señales que se utilizarán se dio inicio al modelado.

Un requisito indispensable con el que debe cumplir una sección de guía-onda, es poder permitir la propagación de al menos un modo de transmisión (m), lo que lleva a fijar como requisito que $m=1$; si el modo es inferior a uno, la señal no podrá propagarse, de ahí que se busque a manera de comprobación que el modo sea igual o mayor a uno [6]. La distancia entre paredes de la guía-onda define la característica importante en el modelado, por lo que se consideró la sección de guía-onda correspondiente a la banda de frecuencias de: 3.6 cm a 2.41 cm. Que se corresponde con un perfil comercial de: 25.4 mm x 12.7 mm. Menos un espesor de pared fijado en: 1.3 mm. La otra característica igualmente importante es la longitud de onda λ de la señal a propagar por la guía-onda.

Todos estos datos iniciales se fijan para el modelado, pero es de suponer que una vez obtenido el modelo, y sometido a la simulación y comprobación de los resultados, y que los resultados sean los esperados para esa banda de frecuencias y de las dimensiones de la guía-onda propuesta, estos puedan ser alterados a voluntad del diseñador o usuario del modelo, con la finalidad de poder utilizarse para cualquier otra banda de frecuencias.

4. Resultados y discusión

4.1 Resultados de la simulación del modelo matemático utilizando una señal que comprende la longitud de onda de: 3.6 cm a 2.41 cm y la sección de guía-onda correspondiente con la banda de frecuencias de prueba.

En la figura 4, se muestra el comportamiento que tiene la señal cuando se varía su longitud de onda. Al ir aumentando la longitud de onda se puede ver que el modo de transmisión disminuye, y se vuelve inferior a uno que como se mencionó en párrafos anteriores, uno es el mínimo que se espera tenga para poder viajar por la sección de guía-onda.

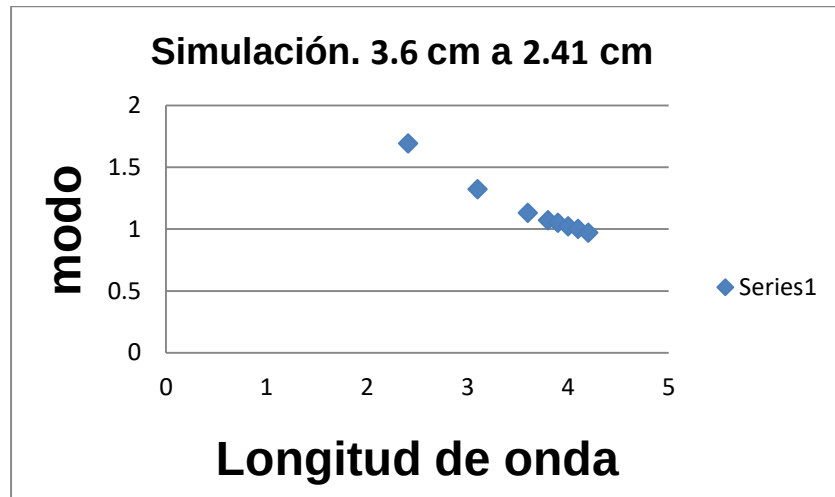


Figura 4. Gráfica que resulta de la simulación. Para una longitud de onda de 3.6 cm a 2.41 cm

Según la gráfica de la figura 4, la señal se propagará dentro de la sección de guía-onda si está en la longitud de onda de: 4.1 cm como máximo, si continúa aumentando su longitud de onda dejará de propagarse.

Hasta aquí sería una simulación para una banda de frecuencias que se corresponde con la guía-onda que por dimensiones de esta última sería la óptima para su propagación.

Si ahora se modifica el intervalo de frecuencias y se utiliza en la simulación un intervalo con longitud de onda de: 3.6 cm a 5.12 cm para la misma sección de guía-onda. El resultado se muestra en la figura 5.

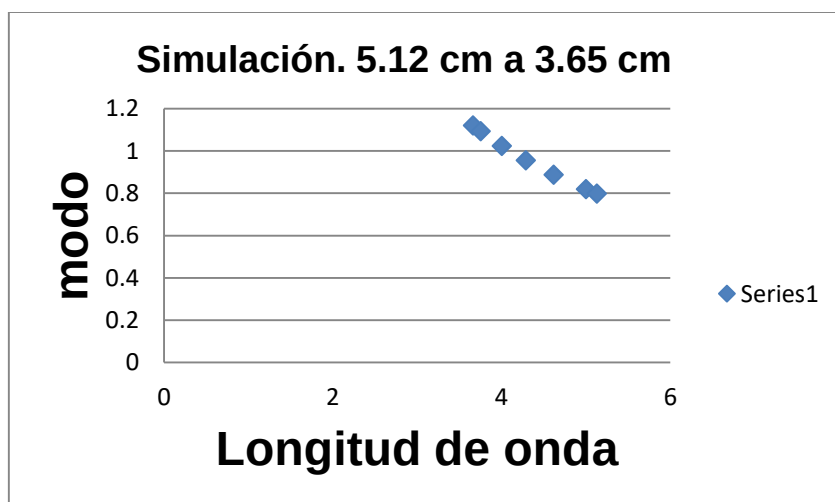


Figura 5. Gráfica que se obtiene con el margen de longitud de onda de los 5.1 cm a 3.65 cm

El resultado que se obtiene con la simulación del modelo matemático es una gráfica en la que se aprecia que se podrán propagar las señales electromagnéticas que tengan una longitud de onda de: 4 cm o menos. Ver figura 5. Éste sería el extremo inferior de la banda de frecuencias que se ha fijado desde un principio como banda de interés o de prueba.

En la figura 6, se aprecia la respuesta del simulador para la longitud de onda de: 2.41 cm a 1.62 cm utilizando la misma sección de guía-onda inicial.

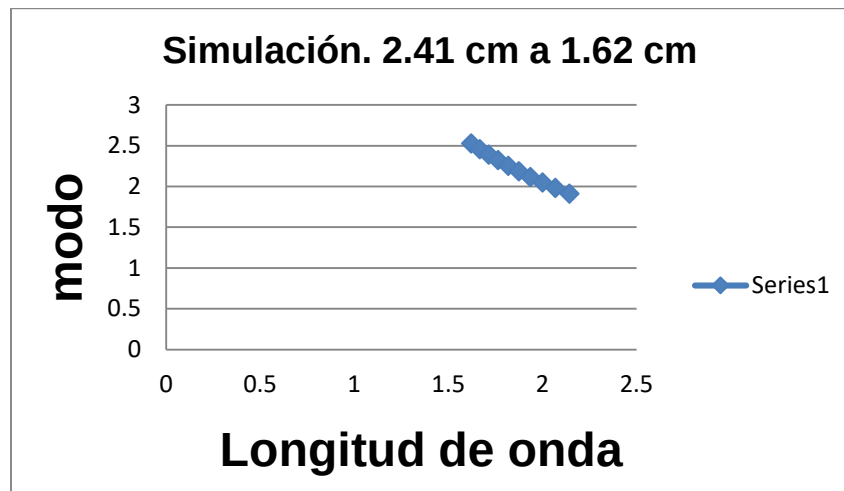


Figura 6. Gráfica que se obtiene con longitudes de onda en el intervalo de 2.41 cm a 1.62 cm

En la gráfica de la figura 6, se aprecia como todas las longitudes de onda pueden propagarse en la sección de guía-onda inicialmente propuesta.

4.2 Simulación del modelo matemático manteniendo la banda de frecuencias original y modificando la dimensión de la distancia de la pared de la guía-onda.

Hasta aquí, se han visto los resultados de la simulación cuando se cambia la longitud de onda de la señal electromagnética que se propaga por la sección de guía-onda, la cual ha sido bien definida por sus dimensiones de ancho y altura.

En esta sección de resultados se presentan las gráficas que se generaron al haber hecho un cambio de dimensiones de la guía-onda en el modelo matemático. Al hacer dicho cambio de dimensiones es posible suponer que es una manera de comprobar, los resultados iniciales cuando se mantuvo la misma guía-onda para diferentes longitudes de onda.

4.2.1 Los resultados obtenidos utilizando las dimensiones para una guía-onda que corresponde a frecuencias de 5.55 GHZ a 8.2 GHZ, se aprecian en la figura 7.

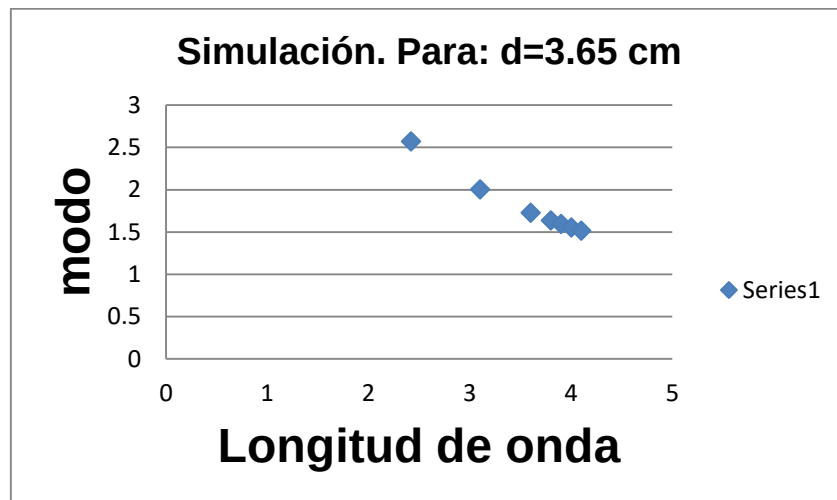


Figura 7. Gráfica que se generó al modificar en el modelo matemático las dimensiones de la guía-onda. Dimensiones que corresponden a una guía-onda en las longitudes de onda de: 5.1 cm a 3.6 cm

En la gráfica de la figura 7, se aprecia que todas las señales enviadas por esa sección de guía-onda, las cuales cubren las longitudes de onda de 3.6 cm a 2.41 cm, van a poder propagarse sin problema, lo cual indica que los resultados del modelo matemático son adecuados, ya que al ser dimensiones de guía-onda mayores las frecuencias altas pasarán, se propagarán.

4.2.2 En la figura 8, se aprecia la gráfica generada al modificar las dimensiones de la guía-onda en el modelo matemático. Sus dimensiones corresponden con las longitudes de onda de frecuencias superiores es decir, para: 2.41 cm a 1.68 cm.

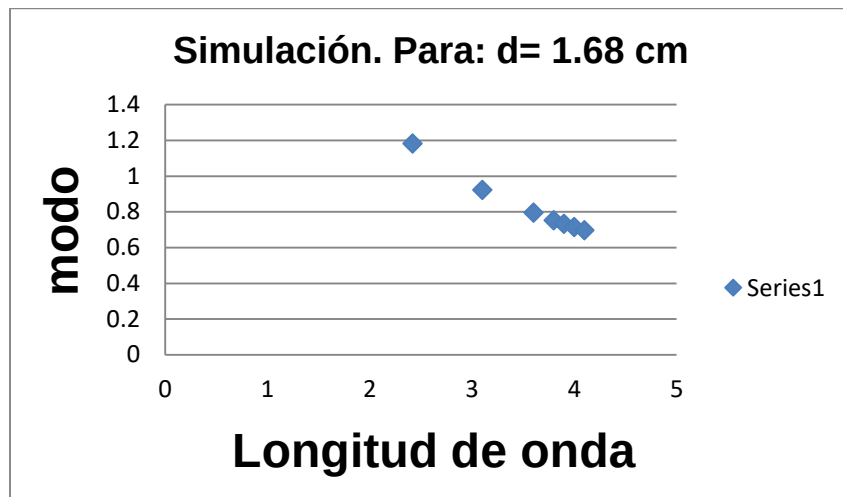


Figura 8. Gráfica que corresponde con la respuesta del simulador a un cambio de dimensiones de la sección de guía-onda. Las dimensiones corresponden con longitudes de onda de: 2.41 cm a 1.66 cm

Como se aprecia en la figura 8, al ser una guía-onda pequeña en comparación con la sección de guía-onda que se fijó como referencia, sólo la frecuencia más alta alcanza a propagarse, esto es toda frecuencia que esté en y por encima de: 12.4 GHz. Por ello la única frecuencia que alcanza a pasar es la que está en el extremo alto de la banda inicial o de prueba.

Los datos iniciales de frecuencia y dimensiones de la guía-onda, se pudieron ir modificando y probando los resultados que la simulación del modelo matemático fue arrojando. Para una primera ronda de simulaciones del modelo se obtuvieron resultados muy cercanos a lo esperado. El proponer modificar la sección de guía-onda manteniendo la banda de frecuencias inicial, permitió tener una comprobación de resultados ya que al variar la longitud de onda dentro de la banda de frecuencias de prueba inicial, y haber cambiado a una sección de guía-onda de dimensiones diferente, permitió la comprobación de que toda la banda de frecuencias pasa cuando se le presentó una dimensión mayor. En cambio cuando se modificó a una guía-onda pequeña, sólo las frecuencias más altas de la banda de pruebas pudieron pasar. El modelo requiere continuar ajustando sus parámetros e interfaz de interacción para que vaya acercándose más a la realidad del comportamiento de una señal en una guía-onda. Los resultados de la simulación se compararon contra las respuestas que típicamente se describen en cualquier libro de texto, no se realizó ningún experimento en laboratorio. Las medidas de las guías-onda fueron tomadas de las tablas en las que se consignan sus dimensiones para una apropiada propagación de la energía aplicada.

Se propone continuar con los ajustes al modelo para que se acerque aún más a los resultados reales, además de aumentar la facilidad en su aplicación para que cualquiera pueda hacer uso del modelo, sin tener complicaciones de otro carácter ajeno a la simulación.

5. Conclusiones

El modelo matemático diseñado ha generado durante su primera ronda de simulaciones los resultados esperados, los que se pueden calificar como correctos.

En este punto del modelado y simulación, cabe mencionar que la primera intención fue corroborar los resultados mediante los límites de la sección de guía-onda propuesta y las longitudes de onda en sus extremos superior e inferior de la banda.

A manera de comprobación se fijaron los límites de las longitudes de onda inicialmente propuestos y lo que se cambió fueron las dimensiones de las secciones de guía-onda, dimensiones hacia un extremo alto banda más baja, y hacia el extremo inferior banda más alta.

En ambos modos de simulación del modelo matemático, las respuestas gráficas fueron las esperadas. Lo que lleva a proponer continuar con su desarrollo.

6. Bibliografía

- 1 George Kennedy. *"Electronic Communications systems"*. Mc graw Hill, USA. 1970
- 2 Bakhtiari, Stoyan I. Ganchev and Reza Zoughi. "Open-ended Rectangular Waveguide for nondestructive Thickness Measurement and Variation Detection of lossy Dielectric Slabs Backed by a conductive plate". IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. Vol. 42, no. 1. Feb 1993
- 3 Collin Robert E. *"Antennas and Radiowave Propagation"* Mc Graw Hill company 1985
- 4 Daniels D.J. *"Radar for Nondestructive Testing of Materials"* Microwave systems and devices department. Leatherhead, surrey, U.K. 2000
- 5 K.C. Gupta. *"Microondas."* Ed. Limusa. 1983.
- 6 Nigel P. Cook. *"Microwave Principles and Systems"* Ed. Prentice hall.
- 7 Robert J. Schoenbeck. 1992. *"Electronic Communications"* Maxwell Macmillan International Editions. 2^{ed} USA
- 8 Edward C. Jordan, Keith G. Balmain. *"Ondas electromagnéticas y sistemas radiantes"* Ed. Paraninfo. 3^{ed} . 1983.
- 9 F.R. Connor. *"Antennas"*. Edward Arnold. U.K. 1972

Manipulación de la Distorsión Armónica Mediante Técnicas de Aprendizaje Automatizado

Gomez Salcido, A¹, Diago Cisneros, L^{1,2}, Bustio-Martínez, L¹, Herrera-Semenets, V³

¹Universidad Iberoamericana, CDMX, México

²Facultad de Física, Universidad de la Habana

³Centro de Tecnologías de Avanzada, La Habana, Cuba

ldiago@fisica.uh.cu alexgomezs99.ag@gmail.com vherrera@cenatav.co.cu
lazaro.bustio@ibero.mx

1. Resumen

En este estudio se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de redes neuronales Long-Short Term Memory (*LSTM*) para predecir series de tiempo de variables características en sistemas eléctricos industriales. La variable por predecir es la distorsión en intensidad de corriente eléctrica, utilizando como covariables el factor de potencia, la distorsión en el voltaje, y la intensidad de corriente eléctrica. Se utilizan mediciones reales como base de análisis, proporcionando una validación de los resultados obtenidos. El estudio muestra la eficacia de las redes LSTM en la predicción de variables de caracterización en sistemas eléctricos industriales, destacando su potencial aplicación en modelos de sistemas eléctricos.

2. Introducción

Existen diferentes factores los cuales pueden afectar la calidad de la energía eléctrica, generando pérdidas económicas y energéticas en los procesos industriales. La *distorsión armónica* y el bajo *factor de potencia* son dos factores que afectan directamente a la calidad de la energía eléctrica. En México, el hecho de tener una mala calidad de energía eléctrica también puede generar penalizaciones por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ^[1], así como problemas con instituciones como la Comisión Reguladora de Energía (CRE) ^[2].

Para combatir los efectos negativos causados por un nivel alto de distorsión armónica y/o un bajo aprovechamiento cuantificado por un bajo factor de potencia es posible utilizar filtros de armónicos ^[3].

El diseño de los filtros de armónicos se escoge en función de un análisis de la red eléctrica contaminada. Actualmente, es posible utilizar métodos de analítica de datos para el estudio de la

distorsión armónica ^[4], así como métodos computacionales para optimizar el proceso de diseño de los filtros ^[5].

La predicción del comportamiento de los sistemas eléctricos, especialmente sistemas eléctricos industriales, es el primer paso para automatizar su estudio y entendimiento. Existen variables que caracterizan los sistemas eléctricos las cuales se comportan como series temporales. Para lo mencionado anteriormente, es posible entrenar una red *LSTM* (Memoria Larga de Corto Plazo o en inglés *Long Short-Term Memory*) para generar predicciones temporales del comportamiento de un sistema, ya que las *LSTM* son eficaces en modelar dependencias a largo plazo en secuencias de datos temporales.

Por todo lo anterior los objetivos de esta investigación son:

- (a) Recopilación y gestión de datos para la utilización de métodos en caracterización de la distorsión armónica.
- (b) Definición y utilización de métodos para caracterizar la calidad de energía eléctrica.
- (c) A partir de los datos obtenidos y los métodos identificados obtener predicciones medibles del comportamiento de la distorsión armónica total en un sistema eléctrico industrial.

3. Condiciones Experimentales

Las Redes Neuronales Recurrentes (RNN) son un tipo de algoritmo de Aprendizaje Profundo que se utiliza para estudiar datos secuenciales, tales como series de tiempo. Una serie de tiempo consiste en una sucesión de observaciones medibles realizadas en momentos de tiempo determinados, dispuestas en orden cronológico y con intervalos temporales uniformes entre ellas ^[6]. Las *RNN* presentan un inconveniente, a medida que la red procesa elementos más espaciados dentro de una serie temporal, tiene problemas en relacionar datos alejados en el tiempo ^[7]. Esto se soluciona mediante redes *LSTM*.

Las *LSTM*, son un tipo especial de redes neuronales recurrentes (RNN) diseñadas para resolver el problema de memoria a corto plazo de RNN convencionales. Para resolver el problema se agregan celdas de memoria las cuáles son capaces de retener información relevante durante una mayor cantidad de tiempo. Para determinar que información es relevante se utilizan funciones sigmoideas y tangente hiperbólica (*tanh*) como compuertas que añaden, conservan o eliminan datos a la celda de memoria o celda de estado. Este tipo de red se escogió para generar predicciones en el comportamiento de la distorsión armónica total en intensidad de corriente (*THD_I*) de un sistema eléctrico.

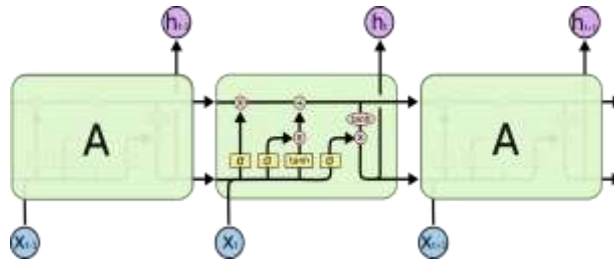


Figura 1. Diagrama de arquitectura de una red LSTM ^[8] el cuál muestra los componentes de una capa

Para este estudio se seleccionaron las siguientes variables pertinentes, las cuales tienen comportamiento como series temporales ^[9]:

- (1) *Factor de Potencia: FP*, Para indicar el aprovechamiento de energía eléctrica.
- (2) *Distorsión Armónica Total en Intensidad de Corriente: THD_I* , Para cuantificar distorsión en intensidad de corriente eléctrica.
- (3) *Intensidad de corriente eléctrica: I* , Indica la cantidad de portadores de carga eléctrica, que atraviesa la unidad de sección transversal, en la unidad de tiempo.
- (4) *Distorsión Armónica Total en Voltaje: THD_V* , Para cuantificar la distorsión en voltaje.

Para la medición de la distorsión armónica y el factor de potencia, entre otras, se utilizan analizadores de red eléctrica ^[10]. El tiempo de conexión de los analizadores puede variar desde horas hasta meses. Estos dispositivos generan un muestreo de variables que describen el sistema ^[11]. Este muestreo se realiza cada período de tiempo t definido por el usuario.

La recopilación de datos utilizados en este estudio se realizó de la mano de la compañía **Técnica Salgar S.A. de C.V.** Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 1. Estas variables se utilizaron para el entrenamiento de una red LSTM que puede ser empleada en la predicción del THD_I :

- %V L1 (%V THD): Representa la distorsión armónica total del voltaje (THD_V) en la fase 1.
- %I L1 (%I THD): Se refiere a la distorsión armónica total de la intensidad de corriente (THD_I) en la fase 1.
- Corriente L1: Intensidad de corriente en fase 1
- Factor de Potencia Trifásico +: FP Trifásico +

El conjunto de datos contiene $n = 4017$ muestras las cuales se midieron cada 5 minutos.

Tabla 1. Covariables de entrada para LSTM

%V L1 (%V THD)	%I L1 (%I THD)	Intensidad de Corriente: L1 (A)	FP: Trifásico
1.800000	3.940000	5.894000	0.85
1.770000	4.120000	5.634000	0.84
1.750000	3.700000	5.670000	0.83
1.720000	4.590000	5.168000	0.84
1.690000	3.770000	5.789000	0.84
...	...	...	...
1.870000	3.890000	6.042000	0.87
1.850000	4.500000	5.221000	0.88
1.840000	4.530000	5.101000	0.88
1.780000	3.810000	5.908000	0.86

Este conjunto de datos se dividió como se muestra en las Figura 2^[12]

- Entrenar: 80%, 3214 muestras
- Validación: 10%, 401 muestras
- Pruebas: 10%, 403 muestras

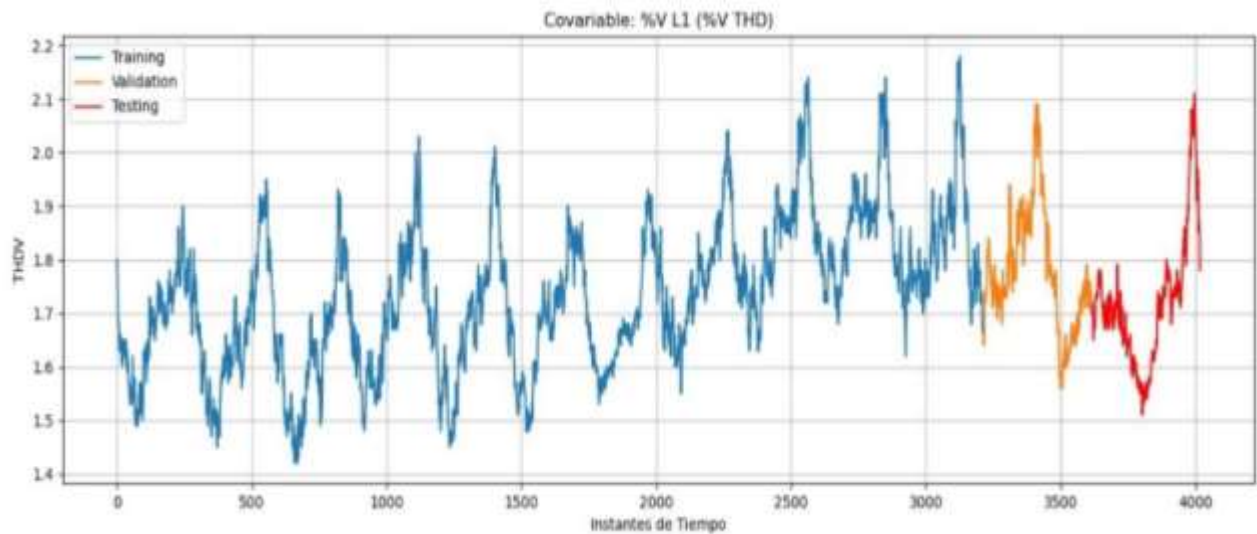
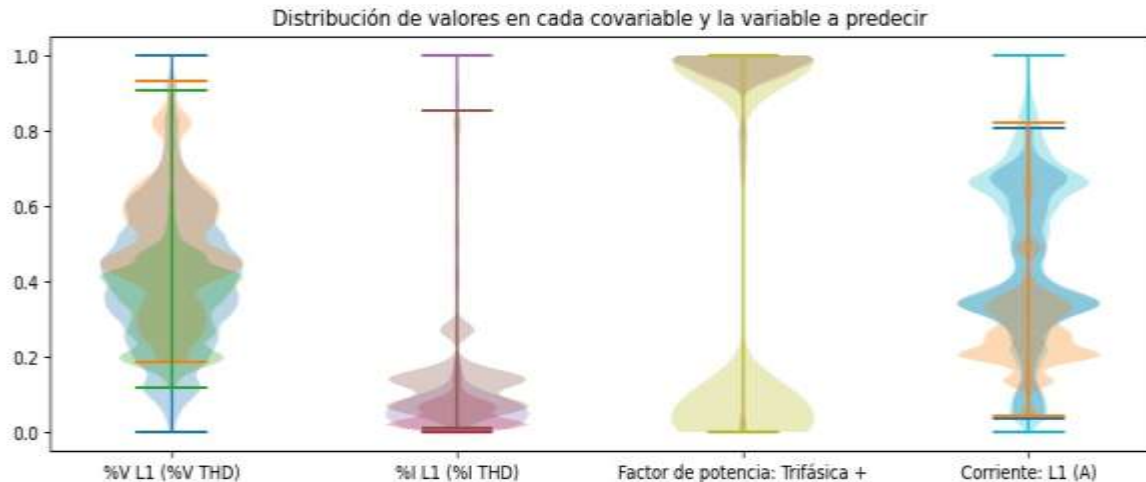


Figura 2. Preparación de datos de entrada a la LSTM (THD_v) dividiendo el set de datos en entrenamiento, validación y pruebas.

Se enfocaron la mayoría de los datos en el entrenamiento. Una separación de sets de datos análoga a la Figura 2 se aplicó a todo el grupo de datos.

Cada una de estas series de datos fue escalado en un intervalo entre [0,1] para entrenar a la red, de forma que las distribuciones de las covariables se pueden observar en la Figura 3.

Figura 3. Distribución de las covariables escaladas a utilizar en el algoritmo en un intervalo unitario para



eliminar distribución atípica.

4.Resultados y discusión

El modelo *LSTM* se entrenó en Python utilizando las bibliotecas *Tensorflow* y *Keras* ^[13], empleando los hiper- parámetros:

- Covariables = 4
- Unidades = $h = 128$ capas
- Unidades = $c = 128$ celdas de memoria
- Iteraciones (*epochs*) = 300
- Aprendizaje (*Learning rate*) = 5×10^{-5}

La selección de estos hiper-parámetros se realizó mediante experimentación y ajuste. Se utilizaron cuatro covariables iniciales (Caso A) basadas en un estudio previo: *Control de calidad y simulación de procesos tecnológicos en la fabricación de equipo eléctrico industrial* ^[9], que las identificó como óptimas para modelar sistemas eléctricos industriales. Estos hiper-parámetros fueron seleccionados para maximizar el rendimiento del modelo en la predicción de la distorsión en la intensidad de corriente. Se utilizó la raíz cuadrada del error cuadrático medio o *RSME* (*Root Mean Square Error*) para calcular la incertidumbre en el modelo *LSTM*.

4.1 Caso A: 4 Covariables.

Con el modelo entrenado se obtuvieron predicciones mostradas en la Figura 5. Se muestra como el modelo tiene problemas para predecir datos con cambios abruptos en los picos de la distorsión. La incertidumbre para esta predicción calculó en $RMSE = 5.6\%$, como se muestra en la Figura 4.

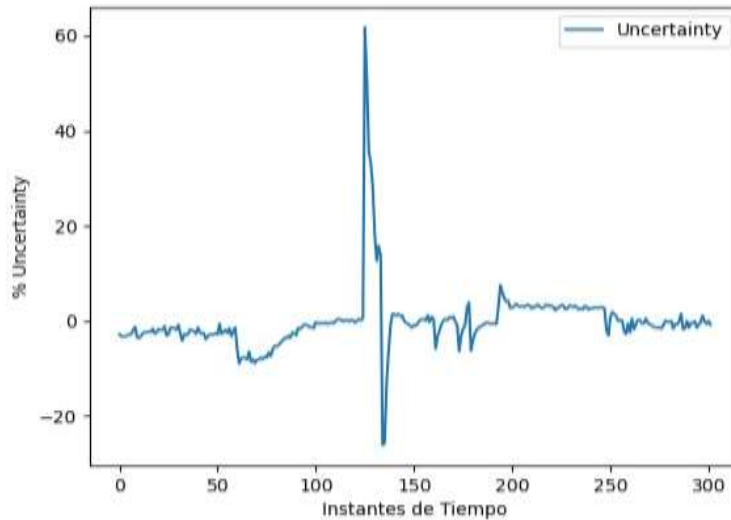


Figura 4. Incertidumbre obtenida para las predicciones obtenidas con el modelo entrenado utilizando los datos de prueba

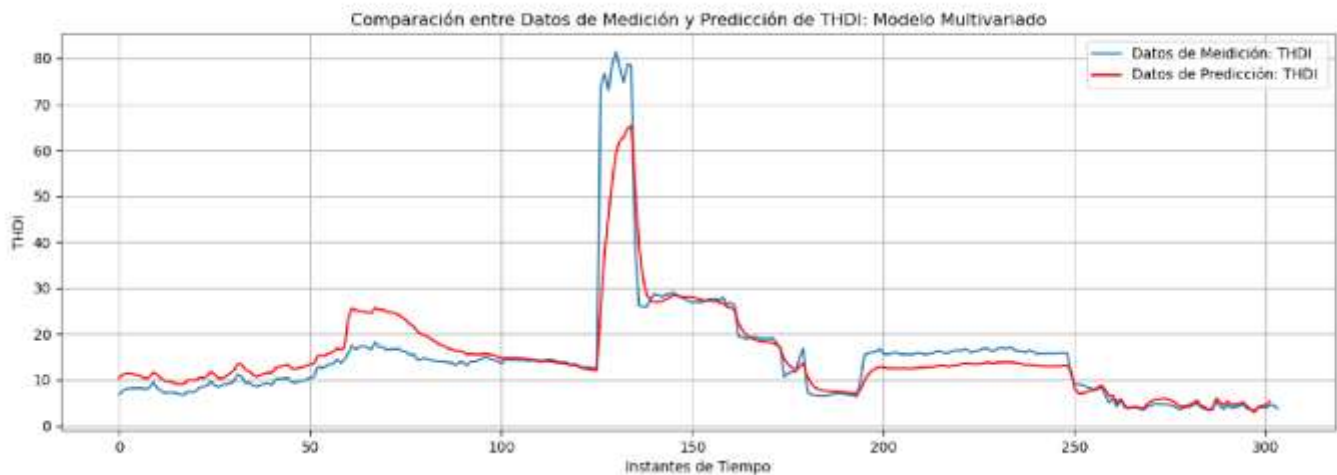


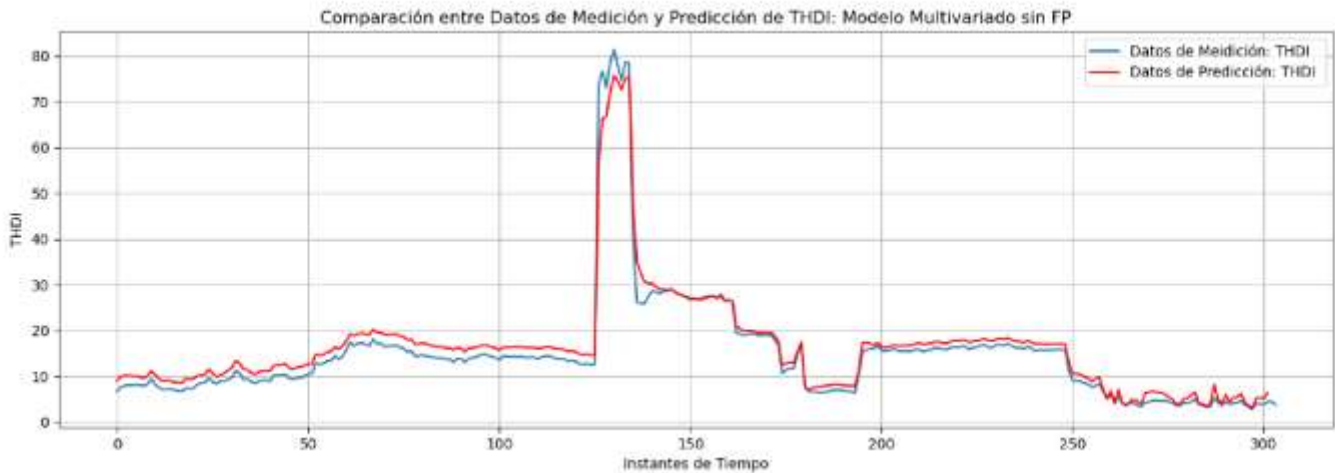
Figura 5. Predicciones y ajuste obtenidos con el modelo entrenado utilizando los datos de prueba

4.2 Caso B: 3 Covariables.

Con el fin de mejorar la eficiencia del modelo se exploró un modelo eliminando la covariable FP , generando así un modelo con solo tres covariables: THD_I , THD_V e I . La correlación entre el FP y

la distorsión THD_i no es clara desde un punto de vista analítico, por lo que se planteó como una covariable parásita.

Al eliminar esta covariable el rendimiento mejoró notoriamente obteniendo predicciones como las mostradas en la Figuras 6. Observando las gráficas de predicción, es claro como el modelo tiene mayor capacidad de adaptarse a las tendencias de cambios abruptos en los picos de



distorsión. La incertidumbre obtenida para el modelo sin FP también mejoró, constando de un valor de $RMSE = 3.9\%$, como se muestra en la Figura 7.

Figura 6. Predicciones y ajuste obtenidos con el modelo entrenado eliminando la covariable FP utilizando los datos de prueba

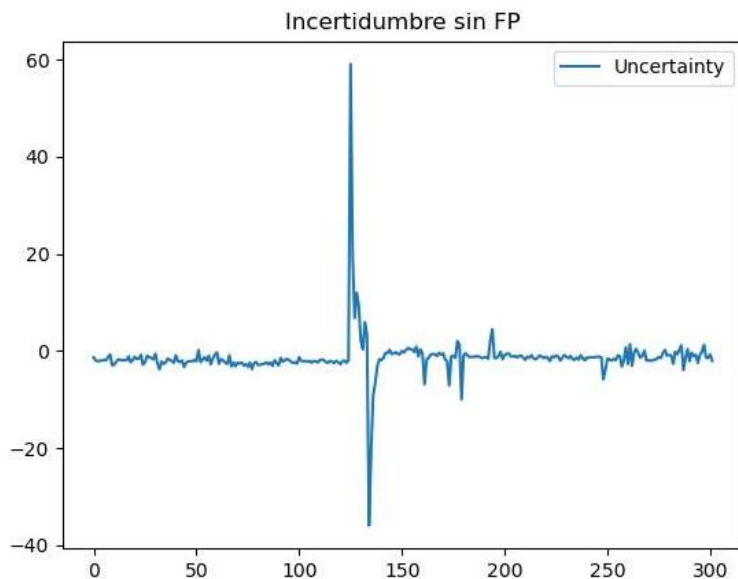


Figura 7. Incertidumbre para las predicciones obtenidas con el modelo entrenado eliminando la covariable FP utilizando los datos de prueba

5.Conclusiones

En este estudio se presentan los resultados de entrenamiento de un modelo multivariable de redes neuronales recurrentes *LSTM* para la predicción de distorsión en intensidad de corriente en un sistema eléctrico. Se estudiaron dos variantes al modelo, Caso A y Caso B. Las cuatro covariables iniciales utilizadas son la distorsión en voltaje, distorsión en intensidad de corriente, intensidad de corriente y factor de potencia (Caso A), seguido de una modificación de entrada a tres covariables; eliminando el factor de potencia del modelo (Caso B), la cual se planteó como variable parásita por condiciones analíticas y de los datos.

El modelo fue entrenado en *Python* utilizando *Tensorflow* y *Keras*. El conjunto de datos utilizado consta de un muestreo de 4017 muestras, subdividido en subconjuntos de 3214 muestras de entrenamiento, 401 de validación y 403 de prueba.

El estudio también destaca la importancia de ajustar los hiper-parámetros del modelo, resaltando la necesidad de experimentación rigurosa para obtener resultados óptimos. Se encontró también que los presentados optimizaban el rendimiento. Además, se observó que el modelo fue exitoso en predecir el comportamiento de la (*THD*), especialmente en el Caso B al eliminar la covariable del factor de potencia del modelo. La incertidumbre disminuyó de 5.6% a 3.9% al eliminar el *FP*, lo que demuestra que la exclusión de esta variable contribuyó a una mejora en la precisión de las predicciones del modelo. Este resultado subraya la importancia de considerar cuidadosamente las covariables seleccionadas en el modelado de la distorsión en la intensidad de corriente, y resalta el impacto positivo de una selección estratégica de características en la capacidad predictiva del modelo.

Es pertinente subrayar la importancia de modelar sistemas eléctricos mediante enfoques avanzados como las redes *LSTM*. La capacidad de predecir con precisión la distorsión en la intensidad de corriente, una variable clave en la evaluación y gestión de la calidad de la energía en sistemas industriales a nivel global, destaca el potencial de estos modelos para en un futuro mejorar la eficiencia operativa y la fiabilidad de los sistemas eléctricos industriales. Al proporcionar una comprensión más profunda de los comportamientos y patrones de los sistemas eléctricos, los modelos predictivos pueden desempeñar un papel fundamental en la optimización de la producción de equipo eléctrico industrial, la reducción de costos de producción y la mitigación de corrientes

armónicas. Además, este estudio destaca la necesidad continua de investigación y desarrollo en el campo de la modelización de sistemas eléctricos.

6. Bibliografía

1. CFE, "Tarifas/fp." CFE, 2023. Accedido el: 28/06/2023.
2. "Nom-em-007-cre-2017," 2017.
3. J. Valencia, "Discusión académica con temática filtros de armónicos ing. José Valencia, gerente de proyectos y servicios técnica salgar," 2023.
4. M. Panoiu, C. Panoiu, and L. Ghiormez, "Neuro-fuzzy modeling and prediction of current total harmonic distortion for high power nonlinear loads," in *2018 Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, pp. 1–7, IEEE, 2018.
5. Y. Yan, C. Chen, C. Moo, and C. Hsu, "Harmonic analysis for industrial customers," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 30, no. 2, pp. 462– 468, 1994.
6. C. Hurtado and G. Ríos, "Series de tiempo," *Santiago: Universidad de Chile*, 2008.
7. C. Arana, "Redes neuronales recurrentes: Análisis de los modelos especializados en datos secuenciales," tech. rep., Serie Documentos de Trabajo, 2021.
8. C. Olah *et al.*, "Understanding lstm networks," 2015.
9. A. Gómez Salcido and L. Dr. C Diago Cisneros, "Control de calidad y simulación de procesos tecnológicos en la fabricación de equipo eléctrico industrial," 2023.
10. E. F. Méndez Garcés, "Modelo para el análisis y toma de decisiones mediante el empleo de técnicas de inteligencia artificial para la reducción de la distorsión armónica en redes de energía eléctrica.," Master's thesis, 2017.
11. Circuitur, *SOFTWARE DE ANALISIS DE REDES ELÉCTRICAS POWER VISION MANUAL DE INSTRUCCIONES*. Circuitur, Vial Sant Jordi s/n, 08232 – Viladecavalls, (Barcelona) España.
12. M. Sotaquirá, "Forecasting con redes lstm - parte 3: modelo univariadounistep," 2023.
13. TensorFlow, "TensorFlow Learn," Sin fecha. [En línea].

Dispersión cuántica de fermiones de Dirac en grafeno monocapa unidimensional.

Serna Duarte, E. J.¹ Diago-Cisneros, L.,² Rodríguez Vargas I.³

¹Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

²Universidad de La Habana, Cuba.

³Universidad Autónoma de Zacatecas.

sernaed95@gmail.com

1. Resumen

En este trabajo, presentamos un análisis teórico-computacional de los efectos de la interacción espín-órbita tipo Rashba (SOIR) en la dinámica y dispersión cuántica de fermiones de Dirac (fD) en el grafeno mono-capa (MLG). Usando una aproximación de un paquete de ondas gaussiano (GWP), calculamos la evolución temporal del GWP, para diferentes valores de su número de onda, la energía inicial y la intensidad de la barrera de potencial. Mostramos que la SOIR provoca un cambio en la apariencia y en la intensidad del coeficiente de transmisión. Esto aporta una importante cuestión a la investigación del grafeno, debido a que en el MLG no se había detectado variaciones en el coeficiente de transmisión bajo una incidencia normal. Finalmente, se muestra una nueva propuesta para calcular la densidad de corriente de probabilidad de un flujo de fD en el MLG con interferencia de canales, algo que no se había reportado en la literatura.

2. Introducción

El grafeno es un material bidimensional que presenta propiedades electrónicas y mecánicas excepcionales, lo que lo convierte en un candidato prometedor para diversas aplicaciones tecnológicas. A pesar de que la interacción espín-órbita intrínseca en el grafeno es considerablemente débil debido a su simetría de inversión, no es completamente nula. Esta interacción es fundamental para posibilitar efectos de espintrónica y topológicos. Una forma de generar una SOI efectiva en el grafeno consiste en aplicar campos eléctricos externos o depositar el material sobre sustratos apropiados, lo que da lugar a una interacción tipo Rashba (SOIR) que rompe la simetría de inversión [1,2]. La SOIR acopla el espín del fD con su momento lineal, lo que puede conducir a fenómenos interesantes como el efecto Hall de espín o la apertura de brechas topológicas.

Otro aspecto fascinante del grafeno es la manifestación del efecto Zitterbewegung (ZB), que consiste en oscilaciones rápidas del paquete de onda (WP) electrónico debido a la interferencia entre estados positivos y negativos de energía [3]. El efecto ZB se origina en la relatividad especial, pero también puede observarse en sistemas cuánticos simulados, como el grafeno, donde los electrones se comportan como fD de baja energía. El efecto ZB en el grafeno puede ser modulado por la presencia de campos magnéticos, deformaciones o interacciones de espín-órbita [4,5].

En este artículo, investigamos el comportamiento de la dispersión de los fD en el grafeno, bajo la influencia de la SOIR, mediante el uso de un método numérico de

diferencias finitas. Este método nos permite resolver la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo para un fD en una red hexagonal, sometido a un potencial de tipo Rashba. Para mejorar la eficiencia y precisión de nuestro cálculo, empleamos el cómputo de alto rendimiento con CUDA-Python, una plataforma que permite aprovechar las capacidades de las unidades de procesamiento gráfico (GPU) para realizar operaciones matemáticas paralelizables [6]. Con este enfoque, podemos simular la dinámica del fD en el grafeno con SOIR y explorar las características de la dispersión de los fD. El análisis del efecto ZB en el grafeno será realizado más adelante.

7. Condiciones experimentales

Para investigar la dispersión de fD en grafeno con SOIR, procedemos a través de los pasos siguientes:

3.1 Modelo Físico

Nuestro modelo físico comprende un sustrato de nitruro de boro hexagonal, sobre el cual se ha depositado una MLG y, a su vez, se cubre con una capa superior de dióxido de silicio (como se ve en la Figura 1). Con el fin de confinar el movimiento de un paquete de ondas gaussiano (GWP) en el grafeno creando un canal cuántico, implementamos dos electrodos metálicos que inducen un campo eléctrico perpendicular al plano del grafeno. También se instaure una barrera de potencial eléctrico de forma rectangular dentro del canal, que origina una SOIR.

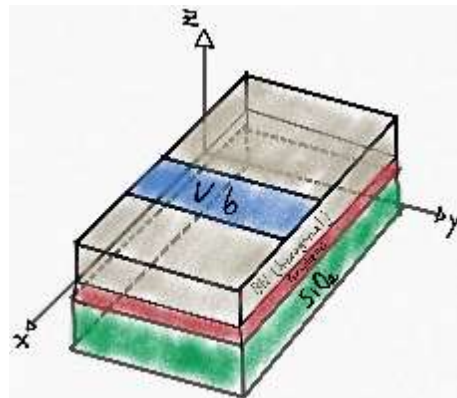


Figura 1. Modelo físico representado por dióxido de silicio (verde), grafeno monocapa (rojo), nitruro de boro hexagonal (gris transparente). El hilo cuántico al cual se confina el GWP cruza a la mitad de manera perpendicular a la barrera de potencial V_b .

3.2 Modelo matemático

A partir del modelo físico, podemos obtener un modelo matemático que describa la evolución temporal del fD en el grafeno con SOIR.

Partimos del Hamiltoniano del Grafeno [4]:

$$\widehat{H}_G = v_f \vec{\sigma} \cdot \vec{P}, \quad (1)$$

donde v_f es la velocidad de fermi aproximadamente igual a 10^6 m/s; $\vec{\sigma}$ es el vector de las matrices de Pauli y $\vec{P}$ es el vector del operador de momento.

El hamiltoniano se puede reescribir como:

$$\widehat{H}_G = -i\hbar v_f \begin{pmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Por otra parte, se define el hamiltoniano de la SOIR [7]:

$$\widehat{H}_R = \begin{pmatrix} 0 & k_{\alpha-} + k_{\beta-} \\ k_{\alpha+} + k_{\beta+} & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

donde $\alpha \frac{k_{\pm}^2}{k_{\mp}} = k_{\alpha\pm}$ y $\beta k_{\pm}^3 = k_{\beta\pm}$ sabiendo que $k_{\pm} = k_x \pm ik_y$ son los números de onda iniciales del sistema. Por otra parte, α es el coeficiente la contribución lineal de SOIR, mientras que β es la contribución cúbica. Igualmente se puede demostrar que $\alpha = -\beta$. Ambos coeficientes sólo están definidos en la misma posición que la barrera de potencial.

Por último, a los dos hamiltonianos anteriores les agregamos la contribución de la barrera de potencial en la forma del hamiltoniano:

$$\widehat{H}_V = I_2 V(x, y), \quad (4)$$

el cual es una matriz identidad multiplicando a la función de potencial (representada en la Figura 2):

$$V(x, y) = \begin{cases} 0 & \forall x & x_1 > x > x_2 \\ V_0 & \forall x, y & x_1 \leq x \leq x_2 \end{cases}. \quad (5)$$

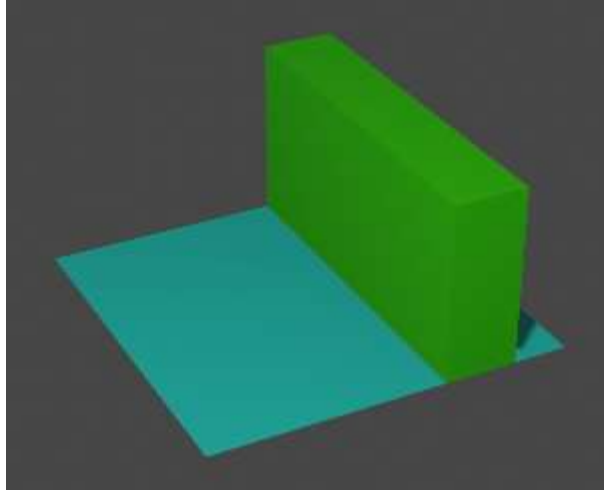


Figura 2. Barrera de potencial perpendicular al eje x (color verde) sobre el MLG (azul claro)

La suma de los tres hamiltonianos (Ecuaciones 2, 3 y 4) genera lo que de aquí en adelante se denomina “Hamiltoniano híbrido”, representado por la siguiente ecuación:

$$\widehat{H}_{hib} = \begin{pmatrix} V(x,y) & C_1(\partial_x - i\partial_y) + k_{R-} \\ C_1(\partial_x + i\partial_y) + k_{R+} & V(x,y) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Consideramos que $k_{\alpha\pm} + k_{\beta\pm} = k_{R\pm}$ para simplificar la expresión.

3.2.1 Operador de evolución temporal

La solución a la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo para un GWP en el grafeno se puede escribir como:

$$\Psi(x, t) = \widehat{U}(t, t_0)\Psi(x, t_0), \quad (7)$$

donde ψ es la función de onda del GWP, que tiene dos componentes de pseudoespinores.

En una dimensión, usualmente se declara de la siguiente manera el GWP:

$$\Psi(x, t_0 = 0) = \frac{\vec{\xi}}{\sigma\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2} + ik_0(x-x_0)\right), \quad (8)$$

donde ξ es la configuración inicial del pseudoespinores.

El operador de evolución temporal (TEO) se define como:

$$\widehat{U}(t, t_0) = \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \int_{t_0}^t \mathbf{H}_{hib} dt\right). \quad (9)$$

La aproximación de Cayley consiste en reemplazar la exponencial del operador H por la fórmula:

$$\exp\left(-\frac{i}{\hbar}\delta t \widehat{H}_{hib}\right) \approx \frac{2I_2}{I_2 + \frac{i\delta t \widehat{H}_{hib}}{2\hbar}} - I_2 \quad (10)$$

que es más precisa que la aproximación de Euler y tiene la ventaja de preservar la norma de la función de onda. Ocupamos δt como el paso en el tiempo.

Siguiendo el álgebra al combinar (7) y (10) se puede llegar a:

$$\Psi(x, t) = \Phi(x, t_0) - \Psi(x, t_0) \quad (11)$$

lo cual se puede resolver como el siguiente sistema de ecuaciones:

$$2\Psi(x, t_0) = \Phi(x, t_0) + T_h \widehat{H}_{hib} \Phi(x, t_0) \quad (12)$$

donde $T_h = \frac{i\delta t}{2\hbar}$ es una constante.

3.3 Modelo de diferencias finitas

Para implementar el método de diferencias finitas, necesitamos discretizar también el espacio en una malla de puntos. Cada punto de la malla tendrá dos valores de la función de onda, uno para cada subred del grafeno (A y B). El método de diferencias finitas nos permite expresar las derivadas espaciales del hamiltoniano híbrido en términos de las diferencias entre los valores de la función de onda en los puntos vecinos de la malla.

Proponemos el uso de las diferencias centradas de primer orden:

$$f'_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\delta x} \quad (13)$$

Aplicando (13) en (12) y separando en componentes A y B, podemos tener dos sistemas de ecuaciones matriciales de la siguiente forma:

$$2 \begin{pmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_n \end{pmatrix}_{A|B} = \begin{pmatrix} c_3 & c_2 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ -c_2 & c_3 & c_2 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & -c_2 & c_3 & c_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & -c_2 & c_3 & c_2 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & -c_2 & c_3 & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_0 \\ \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_n \end{pmatrix}_{A|B} \quad (14)$$

donde las constantes c_2 y c_3 surgen a partir del álgebra y traen la información tanto del grafeno como de la SOIR y la barrera de potencial.

El tamaño de la matriz varía dependiendo del tamaño que se use para el hilo cuántico. Si se escoge $\delta x = 1 \text{ \AA}$ entonces un hilo cuántico de $1000 \text{ \AA}$ generará una matriz de 1000×1000 .

3.4 Cómputo de alto rendimiento

Para resolver la Ecuación 14, necesitamos invertir la matriz, lo que implica un alto costo computacional, especialmente si consideramos una malla grande con muchos puntos. Para acelerar este proceso, utilizamos el cómputo de alto rendimiento con CUDA-Python, una plataforma que nos permite ejecutar código Python en las GPU, que son capaces de realizar operaciones matemáticas paralelizables de manera más eficiente que las unidades de procesamiento central (CPU). Con esta herramienta, podemos reducir el tiempo de ejecución de nuestro programa y aumentar la precisión de nuestros resultados. Además, podemos visualizar la dinámica del GWP en el grafeno con SOIR y analizar las características de la dispersión de los fD.

3.5 Cálculo de coeficientes de transmisión

La densidad de probabilidad de corriente (PCD) se define como la probabilidad por unidad de tiempo y superficie de que una partícula atraviese una superficie perpendicular a la dirección de la corriente. En nuestro caso, la superficie es el plano xy , y la dirección de la corriente es el eje x . La densidad de probabilidad de corriente se puede obtener a partir de la función de onda del GWP usando la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j} = 0, \quad (15)$$

que relaciona la variación temporal de la densidad de probabilidad con la divergencia de la densidad de probabilidad de corriente. Para calcular esta cantidad, podemos partir de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo, aplicar su traspuesto conjugado, integrar en todo el espacio y desarrollar un poco de álgebra para poder obtener:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int |\Psi|^2 dr = -\frac{1}{i\hbar} \int (\Psi^\dagger H_G^\dagger \Psi - \Psi^\dagger H_G \Psi) dr, \quad (16)$$

donde H_G es el hamiltoniano del grafeno. Podemos asumir el hamiltoniano del grafeno como un hamiltoniano de la ecuación de Dirac, sin embargo, en este ejercicio, sólo se hace uso de la ecuación de Schrödinger. En este caso es el único hamiltoniano que permanece debido a que el de la SOIR y el de la barrera de potencial son constantes.

Sustituyendo H_G y considerando que las matrices de Pauli son hermitianas, se puede aplicar la propiedad $\Psi^\dagger H_G^\dagger \Psi = \Psi H_G \Psi^\dagger$. De esta manera se puede quitar la integral de ambos lados y sustituir otra vez en (15):

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{j} &= v_f \nabla \cdot (\Psi^\dagger \vec{\sigma} \Psi) \\ \vec{j} &= v_f \Psi^\dagger \vec{\sigma} \Psi.\end{aligned}\tag{17}$$

Si se ocupan los valores del paquete cuando se encuentra antes de interactuar con la barrera, decimos que es la PCD es incidente, y tomaremos la que atraviesa como la transmitida.

Con esto podemos entonces calcular los coeficientes de transmisión:

$$T = \frac{|\vec{j}_{trans}|}{|\vec{j}_{inc}|}.\tag{18}$$

4. Resultados y discusión

Para los resultados, nos basamos en cuatro configuraciones iniciales del pseudoespinoz para apegarnos a la literatura. En el artículo de Frolova [9] se hace uso de las siguientes configuraciones:

$$\vec{\xi} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{o} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{o} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \quad \text{o} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \exp(i\pi/4) \end{pmatrix}\tag{19}$$

Para realizar el análisis, se produjeron varias simulaciones para el caso (1, 0) y para comodidad del lector se acomodan las Figuras en la Tabla 1. Observamos cómo se comporta el coeficiente de transmisión respecto al número de onda inicial k_0 del GWP y la intensidad del potencial de la barrera o su “altura” V respecto a la energía inicial del GWP E . También comparamos cómo se ven las gráficas cuando se toma en cuenta la SOIR y cuando $\alpha = \beta = 0$.

Tabla 1. Relación de figuras con los respectivos parámetros usados

	Propagación en X	Propagación en Y
Sin SOIR	Figura 3	Figura 4
Con SOIR	Figura 5	Figura 6

Cuando sí se toma en cuenta la SOIR se hace tomando los valores $\alpha = 0.2$ y $\beta = -0.2$, que son valores aproximados a los que se han reportado anteriormente en la literatura [10, 11].

El coeficiente de transmisión (eje vertical de las gráficas 3D) tiene una variación minúscula en las Figuras 3 y 4, varía desde 0.992 hasta 1.000. Según la literatura en el grafeno podemos observar el tunelaje de Klein cuando hay una incidencia normal sobre la barrera de potencial, sin embargo, aquí podemos observar que sí hay una tendencia a una disminución de T , conforme aumenta la energía de la barrera de potencial respecto a la energía inicial del paquete de ondas.

En particular en la Figura 3, podemos ver que cuando el paquete se desplaza en la dirección X no lo hace de manera constante, tiene un salto cuando $V/E \approx 0.1$ esto incluso se asemeja ligeramente al efecto Hall cuántico.

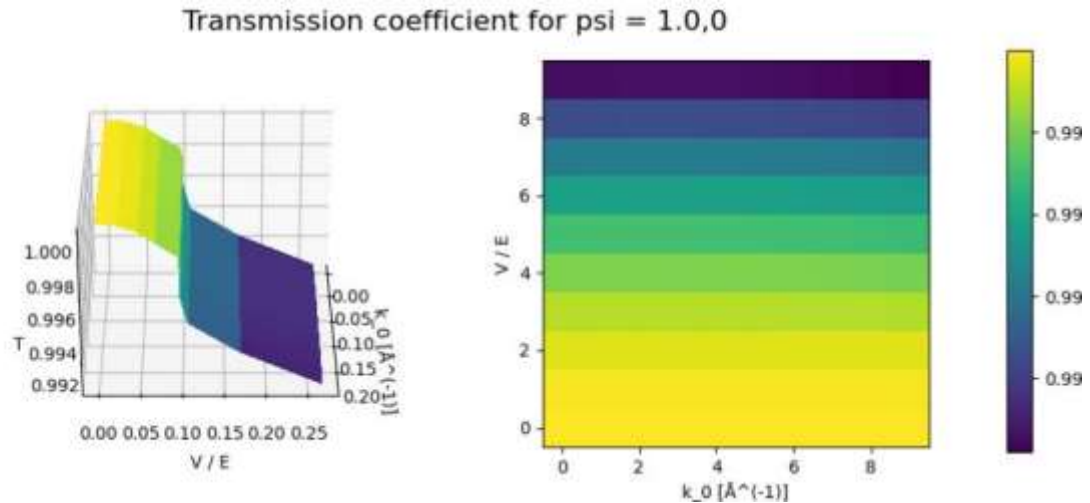


Figura 3. Vista 3D y mapa de colores del coeficiente de transmisión cuando el GWP viaja a lo largo de X y tiene $\xi = (1, 0)$, omitiendo la SOIR.

Mientras que en la Figura 4, cuando el paquete se desplaza en la dirección Y sí tiene un comportamiento más uniforme su coeficiente de transmisión. Aparentemente es un comportamiento logarítmico.

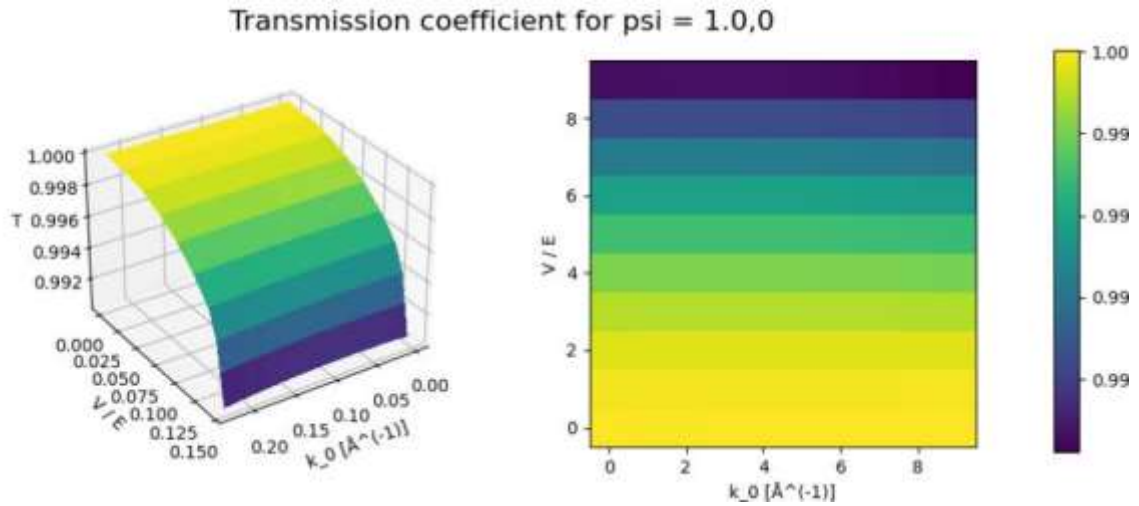


Figura 4. Vista 3D y mapa de colores del coeficiente de transmisión cuando el GWP viaja a lo largo de Y y tiene $\xi = (1, 0)$, omitiendo la SOIR.

Si ahora agregamos SOIR a los resultados previos, primero podemos observar en las Figuras 5 y 6, cuando el GWP se traslada en la dirección de X , tenemos ahora la forma de unas “alas” o un papel ligeramente doblado por la mitad. También podemos notar ahora que la variación del coeficiente de transmisión aumentó significativamente, ahora se encuentra en un intervalo de 0.96 hasta 1.00. Esto implica que la SOIR no sólo afectó la variación de T sino que también alteró su intensidad.

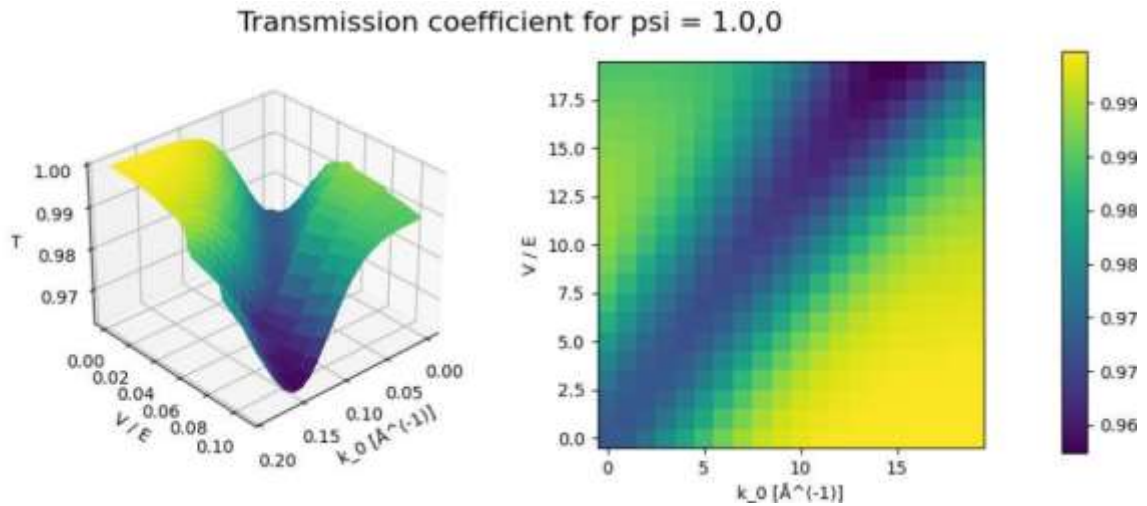


Figura 5. Vista 3D y mapa de colores del coeficiente de transmisión cuando el GWP viaja a lo largo de X y tiene $\xi = (1, 0)$, incluyendo la SOIR.

En este caso, no hay diferencias sustanciales entre la dispersión sobre X o Y , sin embargo, podemos distinguir que la diagonal que se forma en el mapa de colores está ligeramente más inclinada cuando el GWP se propaga por Y en la Figura 6.

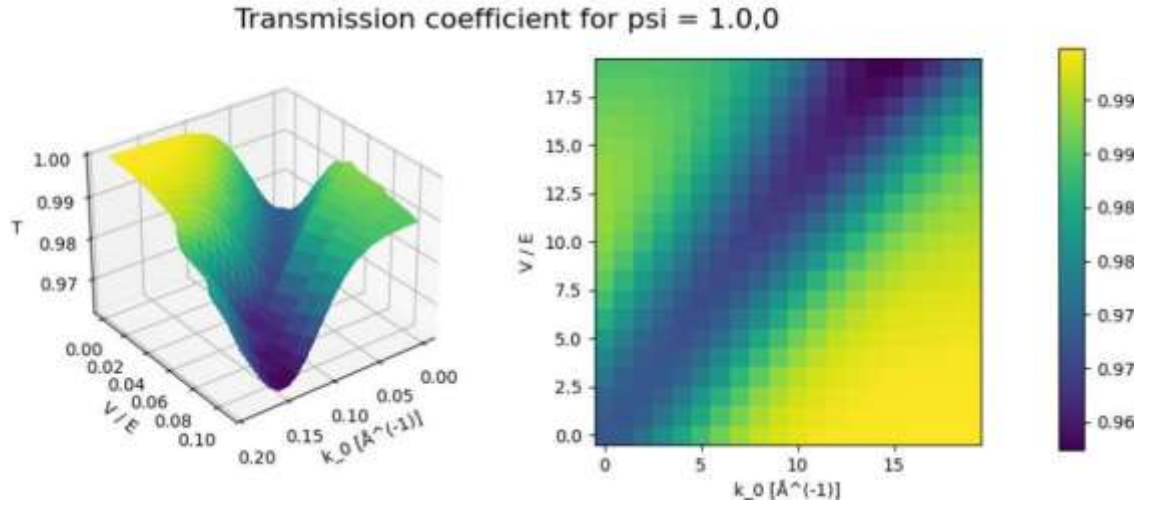


Figura 6. Vista 3D y mapa de colores del coeficiente de transmisión cuando el GWP viaja a lo largo de Y y tiene $\xi = (1, 0)$, incluyendo la SOIR.

Estos resultados son representativos para los demás casos de ξ , no hay diferencias significativas entre las otras configuraciones del pseudoespín y lo que se muestra en este artículo.

El análisis de los resultados muestra que la presencia de la SOIR afecta significativamente al coeficiente de transmisión del GWP en el grafeno. Esto se debe a que la SOIR introduce una mezcla entre las componentes de la matriz de dispersión, lo que modifica la conservación del pseudoespín. La dependencia del ángulo de incidencia y de la energía del GWP también se observa en los mapas de colores, que revelan la existencia de regiones donde la transmisión es mayor o menor. Estas regiones dependen de la orientación relativa entre el pseudoespín y el potencial escalonado, así como de la relación de dispersión del grafeno.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el efecto de la SOIR en la transmisión de los pseudoespines de grafeno cuando inciden sobre un potencial rectangular. Se ha encontrado que la SOIR induce una mezcla entre las componentes de la matriz de dispersión, lo que resulta en una violación de la regla de Klein para el tunelaje de los pseudoespines. Esta violación se manifiesta como una pequeña desviación del valor unitario del coeficiente de transmisión, que depende del ángulo de incidencia y de la energía de los pseudoespines.

Se ha propuesto que esta desviación se debe a la interferencia entre las ondas incidente y reflejada por la SOIR, que modifica el perfil del potencial efectivo que siente el pseudoespín.

También se realizó un avance significativo al calcular la PCD en el grafeno, debido a que no hay mención a su ecuación en la literatura hasta la fecha.

Este trabajo aporta una nueva perspectiva sobre el comportamiento cuántico de los pseudoespinores de grafeno, que podría tener implicaciones para el diseño de dispositivos electrónicos y optoelectrónicos basados en este material bidimensional. También abre la posibilidad de explorar otros fenómenos relacionados con la SOIR y la conservación del pseudoespinor, como la generación de corrientes espín-polarizadas o la inducción de transiciones de fase topológicas.

6. Bibliografía

1. Y. Zhang, Y.-W. Tan, H. L. Stormer, and P. Kim, Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene, *Nature* 438, 201 (2005).
2. C. L. Kane and E. J. Mele, Quantum Spin Hall Effect in Graphene, *Phys. Rev. Lett.* 95, 226801 (2005).
3. E. Schrödinger, Über die kräftefreie Bewegung in der relativistischen Quantenmechanik, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, Physikalisch-mathematische Klasse* 24, 418 (1930).
4. M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene, *Nat. Phys.* 2, 620 (2006).
5. B. Trauzettel, D. V. Bulaev, D. Loss, and G. Burkard, Spin qubits in graphene quantum dots, *Nat. Phys.* 3, 192 (2007).
6. A high performance Python compiler, Numba, numba.pydata.org. Accessed 20 July 2024.
7. R. Cuan, L. Diago-Cisneros, Rashba coupling modeling for two dimensional and high order Rashba Hamiltonian for one dimensional confined heavy holes. *Eur. Phys. Lett.* 110, 67001 (2015).
8. A. Carrillo, O. Mendoza, Introducción al método de diferencias finitas y su implementación computacional. Geofísica UNAM, (2015).
9. G. M. Maksimova, E.V. Frolova, *Phys. Rev. B*, 78, 235321, (2008).
10. D. Pesin, A. H. MacDonald, Spintronics and pseudospintronics in graphene and topological insulators, *NMAT*, 11, 409, (2012).

W. Zawadski, T. Rusin. Zitterbewegung (trembling motion) of electrons in semiconductors: a review. *arXiv:1101.0623v1[cond-mat-mes-hall]*, (2011).

Análisis de Estabilidad Global de un ciclo de Curzon-Ahlborn No-endorreversible, con gas de Van Der Waals como sustancia de trabajo.

Pacheco Paez, J.C.,^{1,3} Chimal-Eguía, J.C.,² Ladino-Luna, D.,³ Ramírez-Rojas, A.³ Páez-Hernández, R. T.³

¹Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 420 Col. Nueva el Rosario C.P. 02128, México.

²Laboratorio de Simulación y Modelación, Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional, Av. Juan de Dios Bátiz s/n UP Zacatenco, Ciudad de México C.P. 07738, México.

³Área de Física de Procesos Irreversibles, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Campus Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 420 Col. Nueva el Rosario C.P. 02128, México.

jcpacheco@azc.uam.mx, jchimale@ipn.mx, dll@azc.uam.mx, arr@azc.uam.mx,
phrt@azc.uam.mx

1. Resumen

En este trabajo presentamos la estabilidad global de la máquina de Curzon-Ahlborn no-endorreversible con una sustancia de trabajo que satisface la ecuación de estado de Van der Waals, hicimos uso de la teoría de estabilidad de Lyapunov, para una máquina térmica trabajando en régimen de máxima potencia. Analizamos el estado estacionario de las temperaturas intermedias y su comportamiento asintótico para el máquina térmico.

2. Introducción

Con la publicación del trabajo de Curzon-Ahlborn en 1975^[1] que dio prácticamente inicio a una rama de la termodinámica clásica de equilibrio, la llamada termodinámica de tiempos finitos (TTF), muchos trabajos se han publicado dentro del contexto de máquinas térmicas^[2-7]. Uno de los principales objetivos de la TTF es el análisis del funcionamiento óptimo de las máquinas térmicas reales, para obtener nuevos límites de operación de la eficiencia y la potencia de salida en dispositivos térmicos. En el trabajo de Curzon-Ahlborn se presenta una máquina térmica de Carnot en la que no había equilibrio térmico entre el fluido de trabajo y los reservorios térmicos en las ramas isotérmicas del ciclo. Curzon y Ahlborn (CA) demostraron que una máquina térmica de este tipo proporciona una

potencia distinta de cero, una producción de entropía positiva y una eficiencia más realista que la máquina de Carnot.

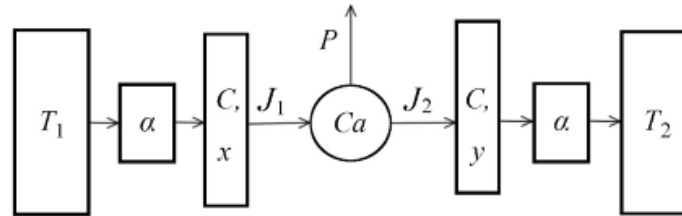


Figura 1. Máquina de Curzon-Ahlborn

La eficiencia de la máquina de CA (ver Figura. 1) a máxima potencia de salida está dada por $\eta_{CA} = 1 - \sqrt{\tau}$, (con $\tau = T_2/T_1$ y $T_1 > T_2$), esta expresión para la eficiencia es una mejor aproximación para las máquinas térmicas reales que la propuesta por Carnot. La mayoría de los estudios de los sistemas TTF se han centrado en sus propiedades energéticas en estado estacionario, que son importantes desde el punto de vista del diseño. Dentro de la TTF también se han realizado algunos estudios de las propiedades dinámicas del sistema como la respuesta a una perturbación ruidosa o la estabilidad del estado estacionario del sistema. En los últimos años diversos estudios han propuesto analizar la estabilidad y la dinámica robusta de modelos de máquinas térmicas. Recientemente se ha estudiado los distintos tipos de problemas de estabilidad en los sistemas dinámicos mediante la teoría de estabilidad, la cuál tiene un papel importante en estudios sobre sistemas e ingeniería. Parte de la teoría de estabilidad son los puntos de equilibrio que generalmente se analizan mediante el Teorema de Estabilidad de Lyapunov. Un punto de equilibrio se dice estable si todas las soluciones que se inicien en las cercanías del punto de equilibrio permanecen en las cercanías del punto de equilibrio; de otro modo el punto de equilibrio es inestable. Si un punto estable cumple que todas las soluciones que se inicien en las cercanías del punto estable permanezcan en las cercanías del punto de equilibrio y además tienden hacia el equilibrio a medida que el tiempo se aproxime a infinito, entonces, el punto de equilibrio se dice asintóticamente estable.

En 2001 Santillán et al.^[8] realizaron el primer trabajo sobre el análisis de estabilidad local de una máquina endorreversible de CA operando a máxima potencia, dichos autores mostraron que un buen diseño genera una estabilidad entre la robustez dinámica y las propiedades termodinámicas óptimas. Páez-Hernández et al.^[9-10] estudiaron efectos de la robustez y de los tiempos de retardo en el rendimiento y las propiedades de estabilidad local de una máquina de Curzon-Ahlborn no-endorreversible, Chimal-Eguía J. C. et al.^[11], Barranco-Jiménez M. A. et al.^[12] analizaron la estabilidad de una máquina de Curzon-Ahlborn, con ley de transferencia de calor Stefan-Boltzmann, Guzman-Vargas et al.^[13] realizaron el análisis de estabilidad local de la máquina de CA bajo distintas leyes de transferencia de calor. Otros autores^[14-18] han estudiado la estabilidad bajo distintos regímenes de operación como el régimen de máxima eficiencia y máxima función ecológica.

3. Características del estado estacionario para la máquina de CA con un gas que obedece la ecuación de estado de Van der Waals.

Dentro de la TTF, la máquina de CA (ver Figura 1) se basa en la hipótesis endorreversible el cuál establece que todas las irreversibilidades están presentes en los acoplamientos entre la máquina térmica con los reservorios de calor, por lo que el ciclo interno que realiza la máquina térmica se considera reversible. Para un modelo no-endorreversible de la máquina de CA se consideran irreversibilidades internas en el ciclo interno de tipo Carnot. De la desigualdad de Clausius podemos escribir:

$$\bar{J}_1 = \frac{J_2}{\bar{y}} R \quad (1)$$

donde R es el parámetro de no-endorreversibilidad tal que $0 < R \leq 1$, donde $\bar{R} = 1$ es el caso endorreversible. Además, la máquina térmica que se muestra en la Figura 1, opera entre las temperaturas $\bar{T}_1$ y $\bar{T}_2$ con $\bar{T}_1 > \bar{T}_2$. Podemos considerar las temperaturas del estado estacionario como $\bar{x}$ y $\bar{y}$, donde $\bar{T}_1 > \bar{x} > \bar{y} > \bar{T}_2$. Si consideramos una ley de enfriamiento de Newton donde el intercambio de calor se realiza a través de los conductores térmicos, ambos con conductancias $\bar{\alpha}$, los flujos irreversibles de $\bar{T}_1$ a $\bar{x}$ y de $\bar{T}_2$ a $\bar{y}$ son $\bar{J}_1$ y $\bar{J}_2$ respectivamente,

$$\bar{J}_1 = \alpha(\bar{T}_1 - \bar{x}) \quad (2)$$

$$\bar{J}_2 = \alpha(\bar{y} - \bar{T}_2) \quad (3)$$

Donde $\bar{\alpha}$ es la conductancia térmica, donde consideramos que es la misma para ambos flujos de calor. Para este modelo de máquina térmica podemos escribir la potencia de salida en el estado estacionario y la eficiencia como

$$\bar{P} = \bar{J}_1 - \bar{J}_2 \quad (4)$$

$$\bar{\eta} = \frac{P}{J_1} = 1 - \frac{J_2}{J_1} \quad (5)$$

Combinando las Ecs. (1-3) y (5), podemos expresar las temperaturas del estado estable $\bar{x}$ y $\bar{y}$ de la forma:

$$\bar{x} = \frac{T_1}{R+1} \left(1 + \frac{\tau}{1-\bar{\eta}} \right) \quad (6)$$

$$\bar{y} = \frac{RT_1}{R+1} \left(1 + \frac{\tau}{1-\bar{\eta}} \right) (1 - \bar{\eta}) \quad (7)$$

Donde $\tau = T_2/T_1$. Dado que hacemos uso de una sustancia de trabajo que obedece la ecuación de estado de Van der Waals, la cual a diferencia de la ecuación de los gases ideales $PV = nRT$, considera una corrección en el volumen de las moléculas, las cuales se tratan como pequeñas esferas duras lo que conlleva a tener un volumen mínimo b (para 1 mol); es decir, en la ecuación de los gases ideales se reemplaza V por $V - b$. Además, la ecuación de Van der Waals considera la atracción entre moléculas la cual tiende a disminuir el volumen, al tomar en cuenta una pequeña capa superficial del gas, su atracción por las moléculas internas debería ser proporcional al cuadrado de la densidad.

Así la eficiencia de la máquina térmica de Curzon-Ahlborn, operando a máxima potencia de salida y considerando un gas de Van der Waals sustancia de trabajo, esta dada por

$$\eta_{vW} = 1 - \left\{ \sqrt{\tau} + \frac{1}{2}(1 - \sqrt{\tau})^2 \lambda_{vW} + \frac{1}{4}(1 - \sqrt{\tau})^2 \left[\frac{(1 - \sqrt{\tau})^2}{2\sqrt{\tau}} - \ln \tau \right] \lambda_{vW}^2 + O(\lambda_{vW}^3) \right\} \quad (8)$$

Con $\tau = T_2/T_1$ y

$$\lambda_{vW} = \frac{1}{\gamma-1} \left(\ln \frac{V_{max}-b}{V_{min}-b} \right)^{-1} \quad (9)$$

donde $\gamma = C_p/C_v$ que es la razón de las capacidades caloríficas, V_{max} y V_{min} son los volúmenes subtendidos por el gas en un ciclo y τ es una constante dependiente del gas. Haciendo una aproximación de primer orden a la Ec. (8), con $\lambda_{vW} = 1$, obtenemos

$$\eta_{vW} = 1 - \sqrt{\tau} - \frac{1}{2}(1 - \sqrt{\tau})^2 = \frac{1-\tau}{2} = \frac{\eta_C}{2} \quad (10)$$

Donde η_C representa la eficiencia de Carnot que también se puede escribir como.

$$\eta_C = 1 - \frac{\tau}{R} \quad (11)$$

Si sustituimos Ec. (11) en Ec. (10) se tiene:

$$\eta_{vW} = \frac{1-\tau}{2} \quad (12)$$

Podemos escribir las temperaturas de estado estacionario en términos de τ al sustituir la Ec. (11) en las Ecs. (6) y (7), como

$$\bar{x} = \frac{T_1}{R+1} \left(\frac{R+\tau+2R\tau}{R+\tau} \right) \quad (13)$$

$$\bar{y} = \frac{RT_1}{R+1} \left(\frac{R+\tau+2R\tau}{2} \right) \quad (14)$$

Para la potencia de salida de la máquina en el estado estable, hacemos uso de las Ecs. (1), (5), (10) y (11) obtenemos

$$\bar{P} = \left(\frac{\alpha}{2}\right) \left(\frac{T_1}{R+1}\right) \left(\frac{(R-\tau)^2}{R+\tau}\right) \quad (15)$$

Para realizar el análisis de estabilidad escribimos $\bar{T}_1$, $\bar{T}_2$ y $\bar{P}$ en términos de $\bar{x}$ y $\bar{y}$, es decir

$$\bar{T}_1 = (R+1)(\bar{x}) \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}+R(2\bar{y}-R\bar{x})} \right) \quad (16)$$

$$\bar{T}_2 = (R+1)(2\bar{y}-R\bar{x}) \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}+R(2\bar{y}-R\bar{x})} \right) \quad (17)$$

$$\bar{P} = -\alpha \frac{(R\bar{x}-\bar{y})^2}{R^2\bar{x}-2R\bar{y}-\bar{y}} \quad (18)$$

4. Análisis de Estabilidad global.

4.1 Dinámica de un modelo de máquina CA.

Ahora describimos la dinámica del modelo de máquina de CA pero ahora fuera del estado estacionario, es decir, consideramos la razón de cambio de las temperaturas internas $\bar{x}$ y $\bar{y}$, y las conductancias térmicas $\bar{\alpha}$, estas temperaturas pueden variar con el tiempo, de acuerdo con el siguiente arreglo de ecuaciones diferenciales

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{c} (\alpha(T_1 - x) - J_1) \quad (19)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{c} (J_2 - \alpha(y - T_2)) \quad (20)$$

Con $\bar{J}_1$ el flujo de calor desde $\bar{x}$ a la sustancia de trabajo y $\bar{J}_2$ el flujo de la máquina de Carnot a $\bar{y}$. Ambas ecuaciones se cancelan cuando $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{J}_1$ y $\bar{J}_2$ toman sus valores de estado estacionario. Escribiendo $\bar{J}_1$ y $\bar{J}_2$ en términos de $\bar{x}$, $\bar{y}$ y la potencia de salida de la máquina,

$$\dot{J}_1 = \frac{Rx}{Rx-y} P \quad (21)$$

$$\dot{J}_2 = \frac{y}{Rx-y} P \quad (22)$$

Suponiendo que la potencia de salida de la máquina de CA esta relacionada con las temperaturas $\bar{x}$ y $\bar{y}$, como en el caso de la potencia de salida para el estado estacionario que esta relacionada con las temperaturas $\bar{x}$ y $\bar{y}$, entonces podemos escribir la potencia de la máquina de CA fuera del estado estacionario en términos de $\bar{x}$ y $\bar{y}$ de la forma

$$P = -\alpha \frac{(Rx-y)^2}{R^2x-2Ry-y} \quad (23)$$

Si sustituimos Ecs. (21-23) en las Ecs. (19) y (20), obtenemos las siguientes ecuaciones diferenciales en términos de las temperaturas $\bar{x}$, $\bar{y}$, T_1 y T_2

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\alpha}{C} \left((T_1 - x) + Rx \frac{Rx-y}{R^2x-2Ry-y} \right) \quad (24)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\alpha}{C} \left(-y \frac{Rx-y}{R^2x-2Ry-y} - (y - T_2) \right). \quad (25)$$

4.1 Análisis de estabilidad local.

Para el análisis de estabilidad local hacemos uso del modelo dinámica establecido por las Ecs. (24-25). En este análisis no se consideró los retrasos temporales para transformar el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y) \quad (26)$$

$$\frac{dy}{dt} = g(x, y) \quad (27)$$

Basándonos en el Strogatz^[19], la estabilidad local en el estado estacionario está determinada por los valores propios de la matriz Jacobiana:

$$J = \begin{pmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{pmatrix} \quad (28)$$

donde

$$f_x = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\bar{x}, \bar{y}} = -\frac{\alpha}{c} (R + 1) \frac{(1+2R)(R+\tau)^2}{(R+\tau+2R\tau)^2} \quad (29)$$

$$f_y = \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{\bar{x}, \bar{y}} = \frac{\alpha}{c} (R + 1) \frac{4R^2}{(R+\tau+2R\tau)^2} \quad (30)$$

$$g_x = \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{\bar{x}, \bar{y}} = \frac{\alpha}{c} (R + 1) \frac{R(R+\tau)^2}{(R+\tau+2R\tau)^2} \quad (31)$$

$$g_y = \left. \frac{\partial g}{\partial y} \right|_{\bar{x}, \bar{y}} = -\frac{\alpha}{c} (R + 1) \frac{R^2+\tau^2+2R\tau(1+\tau)}{(R+\tau+2R\tau)^2} \quad (32)$$

Para la matriz Jacobiana anterior podemos considerar $\bar{\lambda}_1$ y $\bar{\lambda}_2$ los valores propios, y sean $\bar{v}_1$ y $\bar{v}_2$ sus respectivos vectores propios, entonces, la evolución temporal de pequeñas perturbaciones del estado estacionario, δ_x y δ_y , están dados por

$$\begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{pmatrix} = c_1 \vec{v}_1 \exp(\lambda_1 t) + c_2 \vec{v}_2 \exp(\lambda_2 t). \quad (33)$$

Donde c_1 y c_2 son constantes a determinar dadas condiciones iniciales. Entonces, a partir de la ecuación (33) se deduce que el estado estacionario es estable si ambos valores propios tienen valores con parte real negativa, en este caso las funciones δ_x y δ_y convergen a cero monótonamente y el estado estacionario es un nodo estable.

Si consideramos que Ξ y Δ representan la traza y el determinante de la matriz Jacobiana, tal que

$$\Xi(R, \tau) = f_x + g_y, \quad (34)$$

$$\Delta(R, \tau) = f_x g_y - f_y g_x. \quad (35)$$

Entonces para calcular los valores propios de la matriz Jacobina se considera que

$$\lambda_1(R, \tau) = \frac{1}{2} (\Xi + \sqrt{\Xi^2 - 4\Delta}) \quad (36)$$

$$\lambda_2(R, \tau) = \frac{1}{2} (\Xi - \sqrt{\Xi^2 - 4\Delta}) \quad (37)$$

Dado que R y τ son constantes positivas, de las Ecs. (29)-(32) se tiene que $f_x, g_x < 0$ y $f_y, g_y < 0$, lo que implica que $\Xi < 0$, $\Delta > 0$ y $\Xi^2 > 4\Delta$. De las cs. (36)-(37) se obtiene que ambos valores propios λ_1 y λ_2 son números reales negativos y por tanto el sistema está en estado estacionario y se denomina un nodo estable.

5. Estabilidad Global del ciclo de Van Der Waals no-endorreversible.

5.1 Modelo de la Función de Lyapunov para una máquina térmica de CA.

En esta sección aplicamos la teoría de estabilidad de Lyapunov, para analizar y comprobar la estabilidad global para la máquina térmica de CA mediante la construcción de la función de Lyapunov. Esta función denotada por $\overline{V}(x, y)$ debe satisfacer las siguientes condiciones,

- i) $\overline{V}(x, y)$ debe ser definida positiva en una región alrededor del estado estacionario
- ii) $\dot{\overline{V}}(x, y)$ debe ser definida negativa, es decir, $\dot{\overline{V}}(x, y) \leq 0$

Aplicando el método de Krasovskii para construir la función de Lyapunov, el cual consiste en encontrar una matriz definida-negativa de la forma $\overline{J}(X) = A(X) + A(X)^T$, con $\overline{X} = (x, y)$, siendo la matriz Jacobiana $\overline{A}(X)$ y $\overline{A}(X)^T$ su matriz transpuesta

$$\overline{A}(X) = \frac{\alpha}{c} \frac{(R+1)}{(R+\tau+2R\tau)^2} \begin{pmatrix} -(1+2R)(R+\tau)^2 & 4R^2 \\ R(R+\tau)^2 & -(R^2+\tau^2+2R\tau(1+\tau)) \end{pmatrix}. \quad (38)$$

La matriz $\overline{J}(X)$:

$$\overline{J}(X) = \frac{\alpha}{c} \frac{(R+1)}{(R+\tau+2R\tau)^2} \begin{pmatrix} -2(1+2R)(R+\tau)^2 & R(4R+(R+\tau))^2 \\ R(4R+(R+\tau)^2) & -2(R^2+\tau^2+2R\tau(1+\tau)) \end{pmatrix}. \quad (39)$$

Considerando que la matriz $\overline{J}(X)$ está definida negativa, la función de Lyapunov mediante el enfoque de Krasovskii esta dada por

$$\overline{V}(X) = \langle \overline{F}(X), \overline{F}(X) \rangle = |\overline{F}(X)|^2, \quad (40)$$

donde $\overline{F}(x, y) = (x, y)$, y $\overline{(x, y)}$ es el punto del sistema, aplicando a nuestro análisis

$$V(x, y) = \frac{\alpha^2}{c^2} \left[\left(T_1 + \frac{(1+R)xy}{R^2x-2Ry-y} \right)^2 + \left(T_2 - y \frac{(Rx-y)y}{-R^2x+2Ry+y} \right)^2 \right]. \quad (41)$$

Se puede verificar en la ecuación anterior, que en el estado estacionario $\overline{V(\vec{x}, \vec{y})} = 0$. Por otro lado la función cumple

$$\dot{V}(x, y) = \frac{\partial V}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial V}{\partial y} \dot{y} = \langle \nabla V, \dot{X} \rangle \leq 0, \quad (42)$$

donde

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\alpha^2 \left(2(1+R)y^2(-R^2(T_1+2RT_1-RT_2)x - ((1+2R)^2T_1+R(1+2R)T_2+(1+2R)^3x)y + 2R(1+R)y^2) \right)}{C^2(R^2x-y-2Ry)^3} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial y} = & \alpha^2(2(1+R)(R^4(T_1-RT_2)x^3 + R^2x^2(-((1+2R)T_1)+x+R(T_2+6RT_2+x+R(1+R)x))y - \\ & 6R^2x(T_2+2RT_2+R(1+R)x)y^2 + 2((1+2R)^2T_2+R(1+R)(1+6R)x)y^3 - 4(1+R)(1+2R)y^4))/C^2(R^2x-y-2Ry)^3 \end{aligned} \quad (44)$$

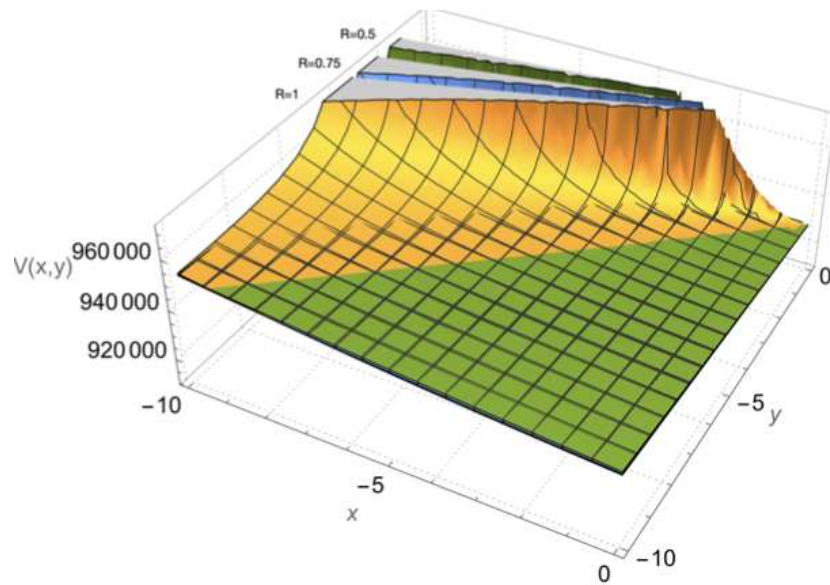


Figura 2. Gráfica de superficie de la función de Lyapunov

En la Figura 2 se muestra la superficie de la función de Lyapunov $\overline{V(x,y)}$ para diferentes valores del parámetro R . Se puede observar que en todos los casos, las superficies presentan el mismo comportamiento, incluso cuando $\overline{R} = 1$ se recupera al estado endoreversible como lo reportado en la literatura^[9].

5. Conclusiones

Se obtuvo una función de Lyapunov correspondiente a un sistema dinámico que cumple con los objetivos planteados, ya que nos permitió analizar teóricamente la estabilidad local del estado estacionario, la cual se presentó como un nodo estable, la estabilidad global del estado estacionario presentó trayectorias con la misma concavidad a distintos valores del parámetro de irreversibilidad y se comprobó numéricamente las propiedades asintóticamente globales. También se da a conocer la importancia del análisis de la termodinámica de tiempos finitos la cual sigue siendo de suma importancia para futuras investigaciones.

6. Bibliografía

11. F.L.Curzon, , B. Ahlborn, "Efficiency of a Carnot engine at maximum power output," Am. J. Phys., 43, pp. 22–24 (1975).
12. Andresen, B.; Salamon, P.; Berry, R.S. "Thermodynamics in finite time: Extremals for imperfect heat engines". J. Chem. Phys., 66, 1571 (1977).
13. Sieniutycz, S.; Salamon, P. Finite-Time Thermodynamics and Thermoeconomics; Taylor & Francis: New York, NY, USA, (1990).
14. De Vos, A. Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion; Oxford University Press: Oxford, UK, (1992).
15. Bejan, A. Entropy generation minimization: "The new thermodynamics of finite size devices and finite-time processes". J. Appl. Phys. 79, 1191–1218 (1996).
16. Hoffmann, K.H.; Burzler, J.M.; Shubert, S. Endoreversible thermodynamics. J. Non-Equilib. Thermodyn. 22, 311–355 (1997).
17. Wu, C.; Chen, L.; Chen, J. (Eds.) Recent Advances in Finite Thermodynamics; Nova Science: New York, NY, USA, (1999).
18. M. Santillán, G. Maya, F. Angulo-Brown, "Local stability analysis of an endoreversible Curzon–Ahlborn–Novikov engine working in a maximum-powerlike regime," J. Phys. D: Appl. Phys., 34, p.p. 2068–2072 (2001).
19. Páez-Hernández, R.T. "Thermodynamic Optimization and robustness Dynamic of Thermal Engines and Some Biological Systems". Ph.D. Thesis, Escuela Superior de Física y Matemáticas, IPN, Mexico City, Mexico, 2008. (In Spanish).
20. Páez-Hernández R.T., Angulo-Brown F, and Santillán M, "Dynamic Robustness and Thermodynamic Optimization in a Non-Endoreversible Curzon-Ahlborn engine", J. Non-Equilib. Thermodyn., 31, p.p. 173–188 (2006).
21. Chimal-Eguía J.C., Barranco-Jiménez M.A. and Angulo-Brown F, "Stability analysis of an endoreversible heat engine with Stefan-Boltzmann heat transfer law working in a maximum power-like regime", Open Syst. Inf. Dyn., 13 (1), pp. 43-54. (2006).
22. Barranco-Jiménez M.A., Páez-Hernández R. T., Reyes-Ramírez I and Guzmán-Vargas L., "Local stability analysis of a thermo-economic model of a Novikov-Curzon-Ahlborn heat engine", Entropy, 13 (9), pp. 1584-1594, (2011).
23. L. Guzmán-Vargas, I. Reyes-Ramírez, N. Sánchez, "The effect of heat transfer laws and thermal conductances on the local stability of an endoreversible heat engine," J. Phys. D: Appl. Phys., 38, p.p. 1282–1291 (2005).
24. Y.W. Huang, D.X. Sun and Y.M. Kang. "Local stability analysis of a class of endoreversible heat pumps". J. Appl. Phys. 102(3), pp. 034905 (2007).
25. Y.W. Huang. "Local asymptotic stability of an irreversible heat pumps subject to total thermal conductance constraint". Energy Convers. Manage, 50(6). Pp. 1444-1449 (2009).
26. X. H. Wu, L. G. Chen and F.R. Sun. "Local stability of an endoreversible heat pump working at the maximum ecological function", Chinese J, Eng. Thermophys. 32(11), pp. 1811-1815 (in Chinese) (2011).
27. X. H. Wu, L. G. Chen and F.R. Sun. "Local stability of an endoreversible heat pump with linear phenomenological heat transfer law working in an ecological regime", Scientia Iranica B, 19 (6), pp. 1519-1525 (2012).
28. Chimal-Eguía J.C. "Dynamic Stability in an endoreversible Chemical reactor", Rev. Mex. Quim. 14 (3), pp. 703-710, (2015).
29. S.H. Strogatz, "Nonlinear Dynamics and Chaos," Addison Wesley, Reading, MA, (1994).

30. Hoffmann, K.H.; Burzler, J.M.; Shubert, S. Endoreversible thermodynamics. J. Non-Equilib. Thermodyn. 22, 311–355 (1997).

La física médica y su aplicación en el tratamiento de tumores cancerígenos.

Moreno-Torres, L.R.¹, Ramírez-Rojas, A.¹, Cárdenas-Moreno, P.R.¹

¹Área de Física de Procesos Irreversibles, Departamento de Ciencias Básicas,

¹Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco .

lrmt@azc.uam.mx, arr@azc.uam.mx, prcm@azc.uam.mx

1. Resumen

La física médica utiliza principios de la física de radiaciones para aplicarlos a la medicina con el objeto de mejorar los diagnósticos y tratamientos de enfermedades entre las que destacan las oncológicas. La aplicación de la física médica en el tratamiento de tumores cancerosos, juega un papel fundamental en las áreas de Radioterapia y Braquiterapia entre otras, basándose en las propiedades de la radiación ionizante. Por otro lado, la Imagenología es un área que se dedica a obtener Imágenes de diagnóstico médico a partir de los procesos de interacción de radiación con la materia en equipos de Tomografía Axial Computarizada (TAC), Rayos X (RX), tomografía por emisión de positrones (PET). Técnicas como la Tomografía Computarizada (TC) y la resonancia magnética (RM) son fundamentales para detección y seguimiento de tumores. Este trabajo describe los procedimientos en Tomoterapia para el tratamiento de un cáncer de esófago como caso de estudio.

2. Introducción

El tratamiento de tumores cancerígenos con radiación ionizante es un método efectivo para atacar el tejido maligno, en la actualidad existen varios tipos de técnicas de aplicación de radiación ionizante para este fin.

La tomoterapia es un tratamiento de radioterapia que utiliza un sistema de imagen por tomografía computarizada (TC) para administrar dosis de radiación con alta precisión a varios tipos de tumores malignos, este proceso se lleva a cabo siguiendo varios pasos que el físico médico a la par del médico tratante realizan para garantizar el mejor resultado posible al paciente.

Actualmente la tomografía computada (TC) está establecida como una de las técnicas de imagen dominante para la detección y seguimiento de cáncer. Los criterios para estadificación y la evaluación de la respuesta al tratamiento se basan en las dimensiones del tumor y las valoraciones diagnósticas previas. Los equipos de TC adquieren imágenes utilizando una fuente de rayos-x y detectores digitales. La fuente de los rayos-x gira alrededor del paciente, generalmente para obtener un nivel de corte toma 0.5 segundos o menos. A pesar de que este tipo de estudios proveen información clave en cuanto a tamaño tumoral, algunas lesiones pueden no ser detectadas si no se aplica un medio de contraste por vía intravenosa, por vía oral o por ambas.

El contraste también ayuda a visualizar las estructuras vasculares y se puede determinar si están afectadas o no, mejorando la estadificación del paciente y con esto el manejo inicial. A pesar de ser una técnica excepcional, la información obtenida es solo anatómica.⁽¹⁾

La Tomoterapia es una tecnología avanzada de radioterapia que integra la tomografía computarizada (TC) con la radioterapia conformacional, todo en una sola máquina, administra la radiación desde 360° alrededor del cuerpo del paciente, mientras la mesa se mueve como un tomógrafo para ofrecer tratamientos precisos y personalizados contra el cáncer.

Este equipo utiliza un escáner de (TC) integrado para obtener imágenes detalladas de la región a tratar. Esta integración hace que el tratamiento resulte extraordinariamente eficiente y eficaz, el sistema integra la fuente de radiación y un sistema de kilovoltaje, lo cual se traduce en un haz coniforme o “cone beam” con la (TC) incorporada perpendicularmente respecto al acelerador lineal lo cual permite la obtención de imágenes de calidad mucho mayor esto permite la visualización precisa de la lesión y las estructuras circundantes

Para la planificación del tratamiento, con las imágenes obtenidas se define la dosis de radiación necesaria y se adapta el plan para conformar los haces de radiación a la estructura de la lesión o tumor, minimizando la exposición a los tejidos sanos. El sistema Tomotherapy, entrega radiación en forma de múltiples haces de intensidad modulada (IMRT) a través de una máquina que gira alrededor del paciente en forma espiral,

permitiendo así la distribución precisa de la dosis en el tumor, mientras protege las áreas circundantes. El equipo realiza una entrega continua de radiación en una trayectoria espiral, lo que asegura una cobertura homogénea del área objetivo y permite tratar la lesión o tumor, desde múltiples ángulos. ⁽²⁾

La tomoterapia helicoidal es una variante de IMRT, que administra la radiación mediante un haz rotatorio o “fan beam” generado en un acelerador lineal instalado en un brazo o gantry anular (similar al gantry de un TAC). En dicho gantry se ubicaría también el sistema de imagen (TAC) que emite radiación de forma continua y de forma previa al fan beam, mientras la mesa de tratamiento desplaza longitudinalmente al paciente ⁽³⁾. La tomoterapia utiliza haces de radiación coplanares en todas las direcciones. Esto permite restringir deliberadamente la dosis de radiación a través de ciertas trayectorias, de manera que pueden preservarse estructuras sensibles adyacentes al blanco. Una posibilidad de restricción intencionada de dosis es el “bloqueo completo”, que previene que el haz primario incida de forma concentrada a través de una región en riesgo; por el contrario, hace que dicha área reciba una radiación dispersa. Otra posibilidad es el “bloqueo de entrada”, que hace salir el haz de radiación a través de la región en riesgo, después de haber atravesado el target ⁽⁴⁾

Previo al tratamiento, se pueden realizar imágenes adicionales para verificar que el tumor y los tejidos adyacentes no se hayan movido, permitiendo ajusten tiempo real si se requiere. Esto asegura una alta precisión en la entrega de la radiación y un tramemiento adaptado a las necesidades específicas de cada paciente, mejorando la eficacia y reduciendo los efectos secundarios.

La dosis de radioterapia aplicada en el tratamiento de tumores cancerosos puede variar dependiendo de varios factores, como el tamaño y la ubicación del tumor, el tipo de cáncer, el estadio de la enfermedad y las características individuales de cada paciente. En general, las dosis suelen oscilar entre 45 Gy y 50 Gy en fracciones diarias de alrededor de 1.8 Gy a 2 Gy, durante un período de aproximadamente 5 a 6 semanas. Hay que tener en consideración que cada caso es particular y único, por lo que la dosis exacta es determinada para cada caso por un equipo médico especialista en radiooncología.

Cabe mencionar que todo tratamiento con radiación ionizante esta regulado por protocolos internacionales sujetos a normas y estándares establecidos por organizaciones como Organización Mundial de la Salud (OMS), Órgano Internacional de Energía Atómica (OIEA), así como los protocolos establecidos por los fabricantes. Estos están basados en la normatividad de las diferentes secretarías, asociaciones y

organizaciones de cada país, en el caso de México, la Secretaría de Energía (SENER), a través de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS), y la secretaria de salud, que son las encargadas de normar tanto la adquisición y uso de equipos para la especialización médica en tratamientos que utilizan radiación ionizante como la radioterapia con aceleradores lineales. ⁽⁵⁾

3. Condiciones protocolarias

En este trabajo se describirán, de manera general, los pasos, que un equipo multidisciplinario incluyendo a un físico médico, siguen para el tratamiento de este tipo de tumores.

El primer paso es la evaluación del paciente, la cual la realiza un médico oncólogo o un equipo de médicos para diagnosticar y determinar la ubicación del tumor maligno.

Una vez diagnosticado el tipo, tamaño y ubicación del tumor, se toman las imágenes diagnósticas con (TC) y (RM). (Figura 1)

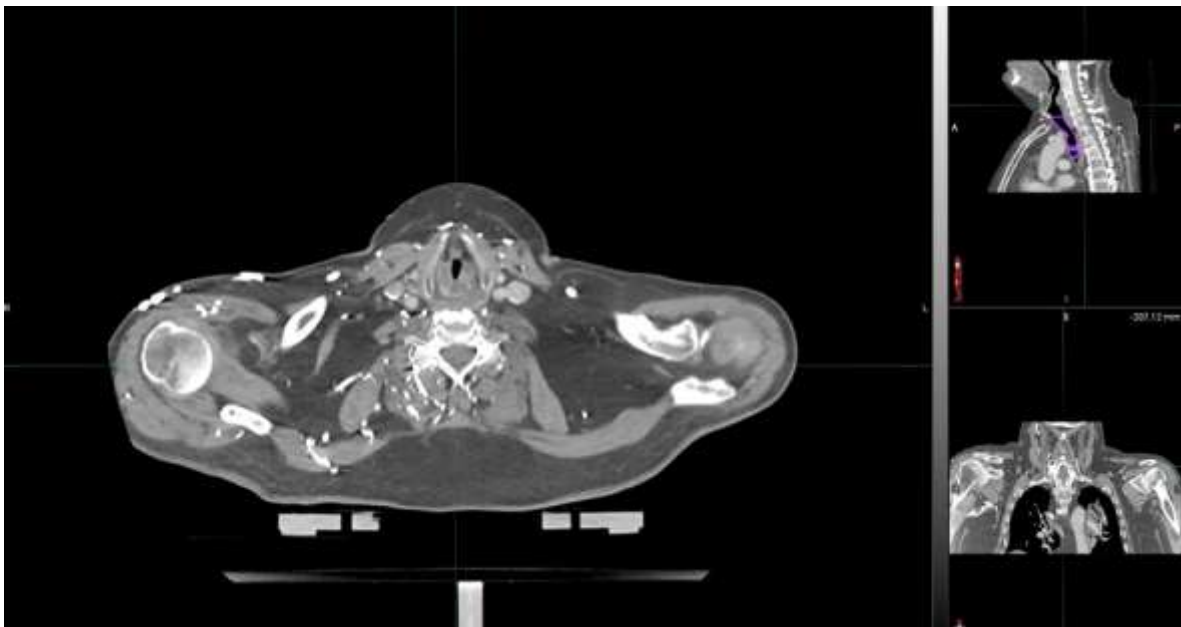


Figura 1. Imágenes de TC de localización del tumor

Con las imágenes obtenidas, como se muestra en la Figura 2, se hace el marcado del contorno, del volumen blanco (tumoral) por el médico el oncólogo así como de los órganos que son de riesgo y que están involucrados en el área de tratamiento de esta manera, se puede restringir la exposición de radiación, lo máximo posible siempre dentro de las restricciones protocolarias, establecidas en la normativa internacional que el médico indique.

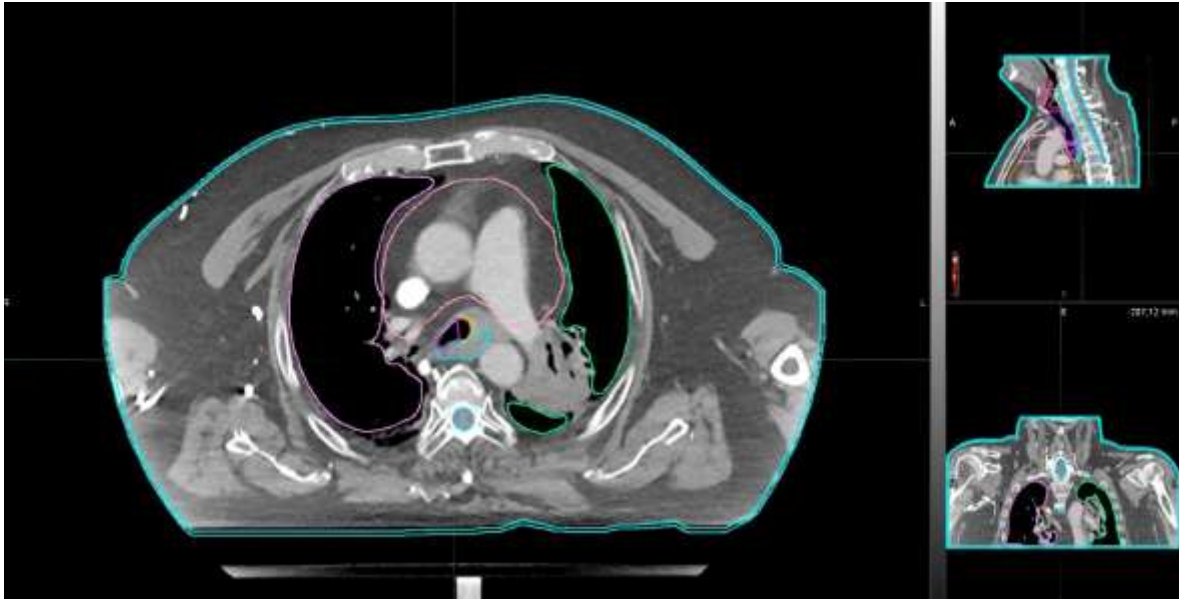


Figura 2. Imágenes de TC con contorneo de lesión y tejido sano circundante.

Se establecen los objetivos de dosis, que incluyen la dosis mínima y máxima que se desea administrar al tumor y a los tejidos sanos. Ésa se conoce como GTV (Gross tumor Volume) O PTV (Planning Target Volume)

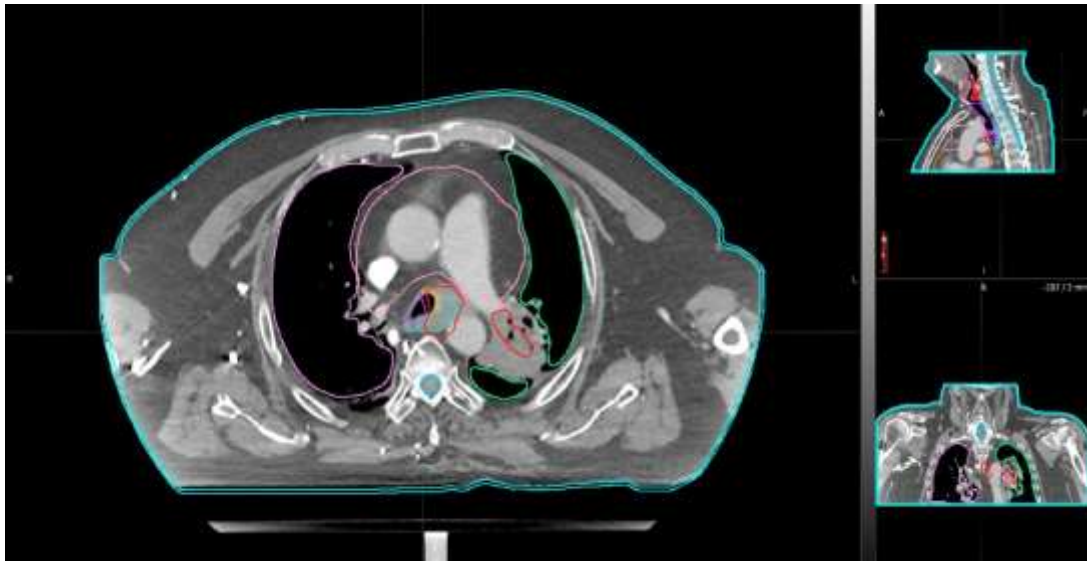


Figura 3 . Imágenes delimitando el área a tratar.

Posteriormente, el volumen objetivo clínico (CTV) (del inglés Clinical Target Volume) se deriva del GTV, añadiendo márgenes a su alrededor, representando la extensión de la enfermedad y el volumen optimo de planificación (PTV) suele ser una expansión del CTV que incluye factores como el movimiento de órganos, tejidos y errores de configuración como se muestra en la Figura 3.

En el siguiente paso se procederá a la planeación del tratamiento utilizando un software especializado, ahí se determinan los parámetros más adecuados en el equipo el tipo de radiación así como la intensidad que se administrará incluyendo la distribución de la dosis con los haces de radiación, como se muestra en la Figura 4.

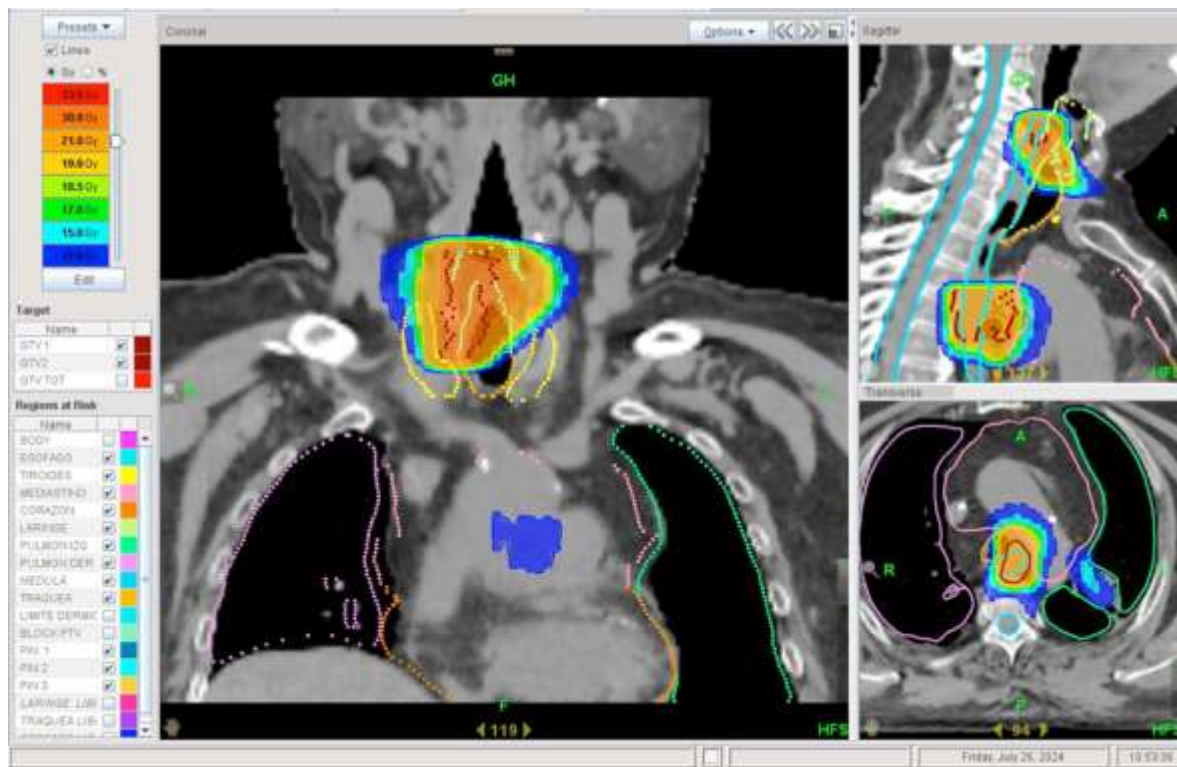


Figura 4 . Distribución de dosis

Posteriormente, la alineación del paciente en la maquina de radioterapia (Figura 5), ya que el Tomotherapy ofrecen la opción de comparar el posicionamiento por imágenes de mega voltaje previo al tratamiento.

Se hace una última revisión para aprobar el plan y se procede a la verificación de tratamiento por el físico médico (Figura 6), aplicando este en una fantoma que simula al paciente y registra las dosis prescritas para el tratamiento, una vez que la verificación es correcta se procede al tratamiento con el paciente.

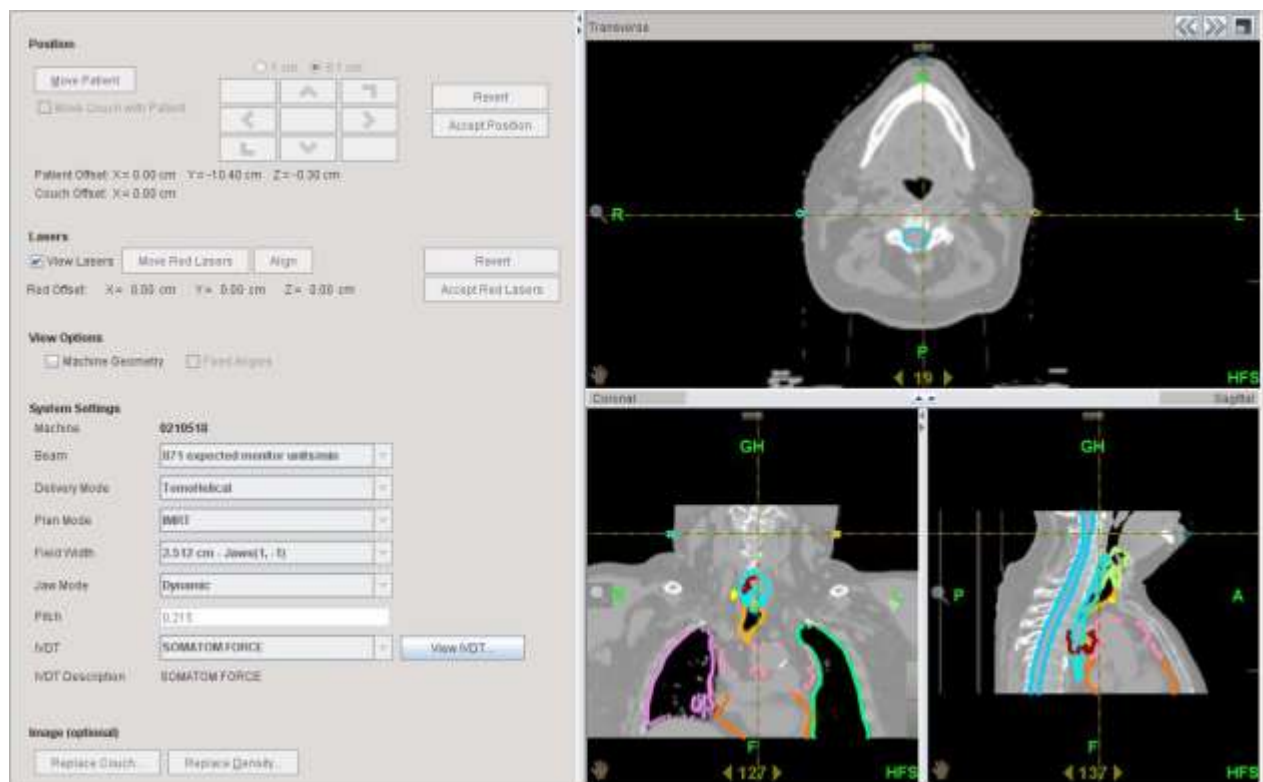


Figura 4 . Posicionamiento

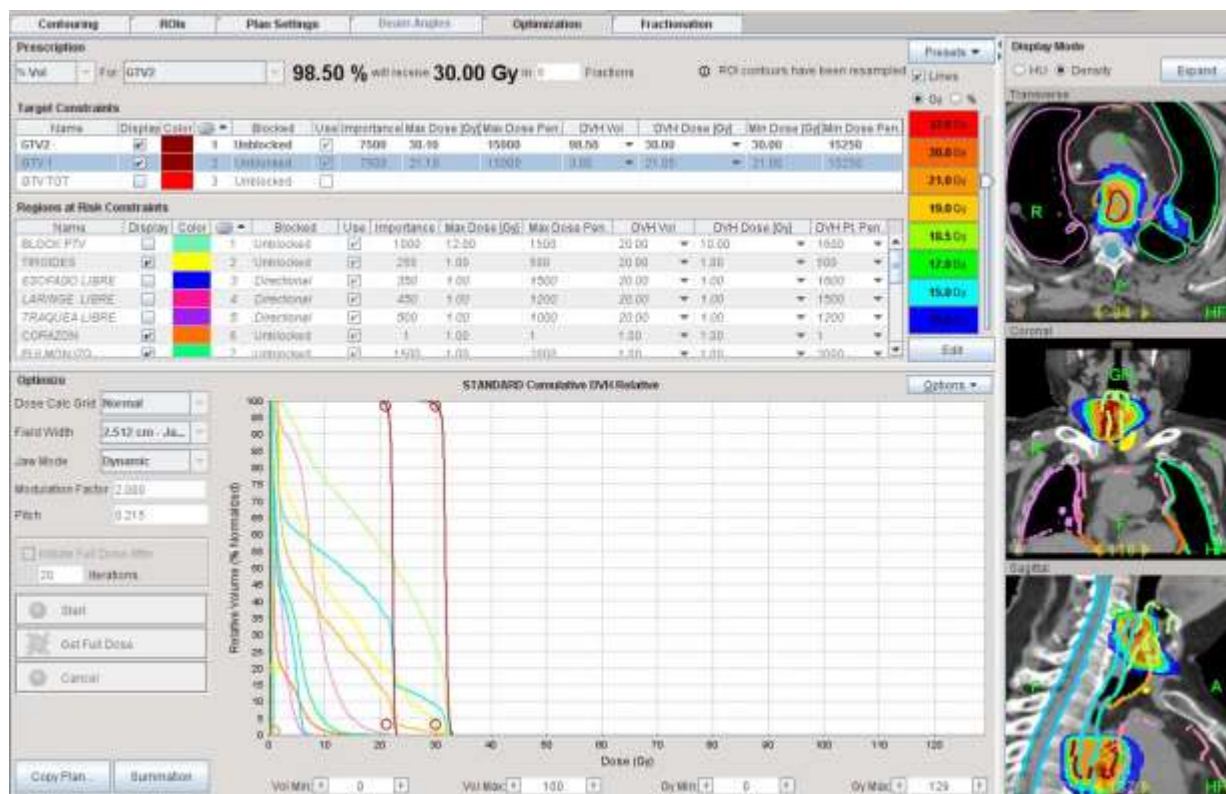


Figura 5 plan de tratamiento de dosis

4. Resultados y discusión.

Para este caso de estudio se determinó la aplicación de 60 Gy repartidos en 6 fracciones de 10 Gy cada una. Una vez que se ha aplicado la radiación al paciente.

Una vez administradas las seis fracciones, el paciente acudirá con el médico oncólogo para determinar el resultado.

La física médica juega un papel fundamental en el tratamiento del cáncer, y el físico médico es una figura clave en este proceso. El físico médico, se encarga de evaluar y manipular los equipos de radioterapia para que funcionen correctamente, su uso sea seguro y efectivo. Dado que los equipos de radioterapia son esencialmente aceleradores de partículas de altas energías es de vital importancia que la calibración de los dispositivos sea casi perfecta y antes de su uso, realizar las pruebas de calidad para garantizar que las dosis de radiación sean precisas y adecuadas para cada paciente.

Además, colaboran con oncólogos y otros profesionales de la salud para planificar y administrar tratamientos personalizados, teniendo en cuenta las características específicas de cada tumor y del paciente. El físico médico o el encargado de seguridad radiológica, son responsables de la protección radiológica, asegurando que tanto los pacientes como el personal médico estén protegidos de la exposición innecesaria a la radiación.

5. Conclusiones

La Tomoterapia Helicoidal es considerada como un tratamiento con radiación de intensidad modulada guiada por imagen ⁽⁶⁾ Los tratamientos hechos con Tomoterapia helicoidal para tumores cancerígenos con el cálculo de dosis se destaca la facultad de dicha tecnología para escalar la dosis administrada al tumor y minimizar la radiación a estructuras adyacentes permitiendo utilizar dicha información para ajustar posibles parámetros del paciente. Si la posición del paciente de acuerdo con la planeación de tratamiento ha sido alterada, entonces la dosis puede ser modificada para representar un nuevo mapeo de la distribución de la dosis administrada respecto a la distribución de dosis planificada. El registro de la dosis permitirá que la dosis administrada sea modificada en tratamientos sucesivos. Este conjunto de procesos de verificación que tiene como objetivo administrar correctamente la dosis a lo largo del tratamiento se ha definido como radioterapia adaptada. El físico médico es esencial para garantizar que los tratamientos oncológicos sean seguros, efectivos y adaptados a las necesidades individuales de cada paciente. El presente trabajo, es una simulación de cáncer de esófago, basado en tumores reales que se han presentado.

6. Bibliografía

1. Miles KA. Functional computed tomography in oncology. Eur J Cancer.; 38: 2079-2084. 2002
2. Welsh JS, Lock M, Harari PM, Tomé WA, Fowler J, Mackie TR, Ritter M, Kapatoes J, Forrest L, Chappell R, Paliwal B, Mehta MP. Clinical implementation of adaptive helical tomotherapy: a unique approach to image-guided intensity modulated radiotherapy. Technol Cancer Res Treat. 2006
3. Román Villegas Portero Tomoterapia helicoidal. Usos actuales y utilidad. Sevilla: Agencia de Evaluación de Tecnologías Sanitarias, 2009.
4. Jeraj R, Mackie TR, Balog J, Olivera G, Pearson D, Kapatoes J, Ruchala K, Reckwerdt P. Radiation characteristics of helical tomotherapy. Med Phys. 2004..
5. NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SSA3-2017
6. Beavis AW. Is tomotherapy the future of IMRT? The British Journal of Radiology, 2004

Mejorando la confiabilidad operativa: Aplicación del AMEF en Equipos Industriales a Través de Casos de Estudio

González-Sosa, J. V.^{1,2}, Mora-Vázquez, A.^{1,2}, Tapia-Medina, C. R.^{1,3}

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.

²Departamento de Sistemas.

³ Departamento de Energía.

jvgs@azc.uam.mx, amora@azc.uam.mx, crtm@azc.uam.mx

1. Resumen

El artículo presenta cómo el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) se utiliza para identificar y mitigar riesgos en la operación de maquinaria industrial. A través de diversas aplicaciones prácticas, se analizan casos de estudio que demuestran la eficacia del AMEF en la mejora de la confiabilidad de los equipos. Se detallan los pasos del proceso, desde la identificación de fallas potenciales hasta la implementación de acciones correctivas. Los resultados muestran una reducción significativa en fallos operativos y un aumento en la eficiencia general del sistema. Este enfoque no solo optimiza los recursos y minimiza costos, sino que también contribuye a un entorno de trabajo más seguro y eficiente. La adopción del AMEF se propone como una herramienta fundamental para la gestión proactiva de la confiabilidad operativa en la industria.

2. Introducción

La aplicación de la metodología de AMEF permite identificar fallas potenciales y optimizar los procesos de producción ^[1]. Este enfoque no solo estimula las habilidades del personal y mejora las herramientas de trabajo, sino que también contribuye a la seguridad de los equipos y a la estabilidad de los procedimientos.

La implementación del AMEF en la cadena agroindustrial del pimiento facilita la realización de un análisis prospectivo que permite anticipar posibles causas de fallas. Este enfoque no solo permite priorizar dichas causas, sino también diseñar medidas efectivas para eliminarlas o reducir su frecuencia de ocurrencia ^[2]. Los números de prioridad de riesgo generados y asignados en este proceso ayudan a establecer un orden de importancia para las causas potenciales de falla así como definir acciones correctivas adecuadas basadas en el conocimiento vasto de la cadena, así como en la experiencia y competencias de los expertos involucrados. Al aplicarse en los procesos constructivos demuestra ser altamente efectiva al identificar y priorizar los fallos al ser detectados en las etapas iniciales resultando en una guía eficaz para las acciones de corrección y así obtener un producto final satisfactorio ^[3]. Es así que podemos decir que la utilización de esta herramienta no solo optimiza la calidad, fiabilidad y seguridad de los procesos de construcción, sino que también incrementa la satisfacción del cliente.

3. Condiciones experimentales

En esta sección se exhiben los estudios de caso programados para llevar a cabo el análisis de AMEF en distintos equipos industriales, con la finalidad de detectar oportunidades de mejora desde la óptica del mantenimiento.

Cizalladora CIM-4-3: está construida con acero de alta calidad. El pedal es ajustable, permitiendo adaptarse a las preferencias del usuario. Las cuchillas son de acero premium, con una resistencia de 80 kg/mm², tratadas térmicamente y rectificadas. Este modelo ha sido diseñado para un uso intensivo prolongado, logrando cortes precisos en lámina y demandando un mantenimiento reducido. Por esta razón, es recomendable realizar un análisis AMEF y evaluar sus condiciones de mantenibilidad.

Esmeril de banco: Un esmeril de banco es una herramienta eléctrica utilizada principalmente para afilar, dar forma y pulir herramientas y piezas de metal. Consiste en un motor montado que impulsa dos muelas abrasivas en sus extremos, permitiendo trabajar materiales duros de manera eficiente. Su diseño robusto y su capacidad para realizar tareas precisas lo convierten en un elemento esencial en talleres mecánicos y de carpintería. Además, ofrece una gran versatilidad al permitir ajustes en la velocidad y el tipo de muelas según la necesidad del trabajo.

Motor eléctrico W21 Magnet trifásico: diseñado para operar con corriente alterna trifásica, presenta un marco resistente de aluminio con clasificación IP5. Estos motores ofrecen un alto rendimiento y eficiencia. El modelo W21 es la opción perfecta para diversas aplicaciones industriales exigentes, incluyendo bombas, ventiladores, molinos, elevadores, prensas y amoladoras.

Los tres casos de estudio previamente mencionados son parte de un conjunto de equipos industriales que se pueden analizar mediante AMEF, lo que permite mejorar su mantenibilidad en el entorno industrial.

Aplicación de AMEF en cada caso de estudio.

Se inicia definiendo los parámetros relevantes para cada caso, utilizando el siguiente formato en el cual se incluirá la información necesaria para la evaluación correspondiente. En la figura 1 se tiene la aplicación del AMEF para la cizalla.

ANÁLISIS DE FALLOS Y EFECTOS (AMFE)										CODIGO:		5213216				
										EDICION:		PRIMERA				
										FECHA:						
CLIENTE						DENOMINACION DE PRODUCTO			CIZALLADORA CIM-43			PREPARADO POR				
PLANTA						REFERENCIAS						REVISADO				
PROVEEDORES INVOLUCRADOS						NIVEL DE MODIFICACIONES			BAJA			APROBADO				
DESCRIPCION DE LA FASE, FUNCION O CARACTERISTICAS	MODO/ POTENCIALES DE FALLO	EFECTOS POTENCIALES DE FALLO	GRAVEDAD	TIPO	CAUSA POTENCIAL DE FALLO	OCURRENCIAS	VERIFICACION Y/O CONTROLES ACTUALES	DETECCION	NPR	ACCIONES RECOMENDADAS	AREA O PERSONA RESPONSABLE	RESULTADOS DE LAS ACCIONES				
												ACCIONES REALIZADAS	GRAVEDAD	OCURRENCIA	DETECCION	NPR
MESA DE TRABAJO	Superficie irregular por desgaste	Deslizamiento del material no deseado	4	CI	Golpes en la superficie de la mesa	1	Deslizamiento adecuado para realizar la operación	1	4	Evitar colocar o realizar operaciones sobre la mesa de trabajo	Area de mantenimiento	Verificación de el adecuado deslizamiento del material	3	1	1	3
SWITCH	El uso ya no permita el accionar el apagado/en cendido del equipo.	Que se el boton de encendido/apagado ya no se accione	10	Δ	Uso constante al activar el equipo	5	Al accionarlo permite el encendido y apagado del mismo	5	250	Cambio periodico de este sistema ya que falla con frecuencia	Area de mantenimiento	Programar el cambio periodico de este sistema	10	3	3	90
MOTOR	Corto o sobrecalentamiento	No habra movimiento para que funcione la cizalla	10	Δ	Sobrecarga/ calentamiento	2	Revolucion y potencia adecuada	2	40	Evitar los sobrecalentamiento y dar mantenimiento periodico	Area de mantenimiento	El mantenimiento preventivo en los sistemas electricos	10	2	2	40
PEDAL/ BARRA	Ruptura del mismo o falla en el mecanismo de embrage	No se podra accinar en embrage con el motor	10	Δ	Que el sistema con el embrage no lo accione.	1	Movimientos suaves que accione el sistema de cichillas	1	10	Accionar el sistema con movimientos suaves y no forzarlo	Area de mantenimiento	Verificación de que el pedal accione de forma correcta y suave.	10	1	1	10
CUCHILLAS	El filo sea incorrecto y provoque rebabas	Cortes imprecisos y con escoria	5	CS	Uso constante o un filo inadecuado	5	El corte en el material debe ser uniforme y sin rebabas	5	125	Verificación constante de el filo de las cuchillas	Area de mantenimiento	Afilamiento y verificación del corte	5	5	4	100
PISON	Falla en los pistones donde ya no ejerzan la suficiente fuerza de sujecion.	Movimiento del material al accionar	5	CI	Desgaste de los pistones	2	Presion adecuada al momento de accionar las cuchillas, ademas el material no se debe mover	1	10	Verificación de la presion de los resortes	Area de mantenimiento	Sustitucion de la pieza cuando se baje su fuerza del resorte del piston	4	1	1	4
CORREDORA/ PORTA CUCHILLA	No permitir los movimientos verticales	El movimiento vertical es el que realiza el corte por ende no se puede cizallar	10	Δ	Los ejes no permitan el deslizamiento correcto de la corredora	1	Corredora se deslice de forma correcta sin vibrar y sin pausas	1	10	Mantener lubricada el eje de deslizamiento de la corredora	Area de mantenimiento	Un debido mantenimiento en aspectos de lubricacion y accionamiento en los embrages.	10	1	1	10

Figura 1. AMEF aplicado a la cizalla. Fuente: Autores

En la figura 1 se puede observar que el número de riesgo prioritario (NPR) ha disminuido significativamente tras el análisis del switch, de 250 a 90, lo cual es representativo en evaluaciones con AMEF.

Para el caso del esmeril de banco la aplicación del formato correspondiente se muestra en la figura 2.

ANÁLISIS DE FALLOS Y EFECTOS (AMFE)							CÓDIGO:			EDICIÓN:		FECHA:				
CLIENTE	XXXXXXXX			DENOMINACIÓN DE PRODUCTO			Esmeril de Banco			PREPARADO POR						
PLANTA	XXXXXXXX			REFERENCIAS			XXXXXXXX			REVISADO						
PROVEEDORES INVOLUCRADOS	SKIL			NIVEL DE MODIFICACIONES CLIENTE			XXXXXXXX			APROBADO						
DESCRIPCIÓN DE LA RESPUESTA/COMPORTAMIENTO	MODO POTENCIAL DE FALLO	EFECTO POTENCIAL DE FALLO	GRAVEDAD	TIPO	CAUSA POTENCIAL DE FALLO	OCURRENCIAS	VERIFICACIÓN O CONTROLES ACTUALES	EFECTOS	NPR	ACCIONES RECOMENDADAS	ÁREA O PERSONA RESPONSABLE	RESULTADOS DE LAS ACCIONES				
												ACCIONES REALIZADAS	GRAVEDAD	OCURRENCIA	DETECCIÓN	NPR
Esmeril de Banco	Interruptor	No enciende, no prende y apaga.	10	∇	Uso excesivo, desgaste, prender y apagar constantemente.	4	Revisión constante	2	80	Mantenimiento predictivo	Mantenimiento y usuario de equipo	Mantenimiento predictivo	1	6	2	12
	Motor	Fuente de alimentación, escobillas, presión de alimentación, junta, aceite.	9	∇	Mantenimiento sobrecalentamiento.	8	Mantenimiento de cierto número de horas de uso	3	216	Mantenimiento después de cierto número de horas de uso	Mantenimiento y usuario de equipo	Mantenimiento después de horas de uso	6	6	1	36
	Base para la fijación	Ruptura de la misma por golpe.	10	∇	Golpe o caída, vibraciones	3	No permanece vertical.	1	30	Evitar los cambios de áreas y así se eviten cualquier golpe al trasladarlo.	Mantenimiento y usuario de equipo	Mantenimiento diario	7	2	2	28
	Reda de esmeril	Rotura o fisura, lubricación, centrado en su eje.	9	∇	desgaste, uso excesivo, uso inadecuado	5	Revisión constante	3	135	Mantenimiento después de cierto número de horas de uso	Mantenimiento y usuario de equipo	Mantenimiento después de horas de uso	5	6	1	30

Figura 2. AMEF aplicado a un esmeril de banco. Fuente: Autores.

Nuevamente, en el caso del esmeril de banco el NPR que tiene un mayor impacto después de aplicar AMEF es el motor de un valor 216 se disminuye a 36, indicando que se pueden llevar a cabo cambios significativos al analizar con mayor profundidad los casos de estudio.

El último caso de estudio es el motor trifásico, el AMEF se muestra en la figura 3.

ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLAS (A.M.E.F.)												Código: AMEF-143				
☐ DISEÑO ☐ PROCESO ☐ MEDIOS												Edición:				
												Fecha:				
Cliente:			Denominación producto:					Motor eléctrico W21		Preparado por:						
Planta:			Referencia/s:								Revisado por:					
Proveedores involucrados:			Nivel de modificaciones cliente:					Bajo		Aprobado por:						
Descripción de la falla/Función/Característica	Modos potenciales de falla	Efectos potenciales del fallo	Gravedad	Tipo	Causa(s) potencial(es) del fallo(s)	Ocurrencia	Verificación(es) y/o control(es) actual(es)	Defección n	NPR	Acción(es) recomendada(s)	Área(s) / persona(s) responsable(s) y fecha de realización	Resultado de las acciones				
												Acciones realizadas	Gravedad	Ocurrencia	Detección	NPR
Bobinado	Bobinado quemado	Que el motor no funcione.	9	∇	Mala conexión eléctrica.	4	No hay revisiones	5	180	Revisar periódicamente	Área de mantenimiento	Revisiones constantes en periodos cortos.	5	2	2	20
Ventilador	Mala lubricación	Exceso de temperatura	5	CS	Suciedad excesiva	2	Revisiones constantes cuando existe la falla	6	60	Revisión por parte del operador.	Área de mantenimiento	Mantenimiento preventivo	3	2	2	12
Carcasa	Desajuste	Algún golpe o mal posición	3	CI	Mal posicionamiento	1	No hay revisiones	5	15	Revisar periódicamente	Área de mantenimiento	Revisiones constantes en periodos cortos.	1	1	1	1
Estator	Desequilibrio de voltaje	Agotamiento de bobinado	8	CS	Corrosión y contaminación	2	Revisiones cuando existe la falla	6	96	Revisión por parte del operador.	Operador del equipo	Mantenimiento preventivo	4	3	2	24
Rotores	Instalación incorrecta	Tensión excesiva en los rodamientos	10	∇	Estrés térmico	7	Revisiones cuando existe la falla y se detecta mov.	5	350	Revisión y lubricación cada mes.	Área de mantenimiento	Mantenimiento preventivo	3	2	2	12
Rodamientos	Desajuste y contaminación	Humedad en los cojinetes	8	CS	Lubricación inadecuada	3	No hay revisiones	5	95	Revisar periódicamente	Área de mantenimiento	Mantenimiento preventivo	5	2	3	30
Placa de bornes	Caída de tensión	Que no funcione el motor	9	∇	La red suministra una tensión muy baja	4	Revisión con el voltímetro	4	144	Medir la tensión de la red en el tablero.	Operador del equipo	Mantenimiento predictivo	4	3	2	24

Figura 3. AMEF aplicado a un motor trifásico. Fuente Autores.

Tomando en cuenta el mismo análisis realizado en los casos anteriores, en la figura 3 correspondiente al motor trifásico, se identificaron los rotores como los elementos críticos. Además, el valor del NPR disminuyó de 350 a 12. Este cambio significativo implica la necesidad de realizar un nuevo análisis para validar este resultado. Este caso se considera un aporte adicional a esta investigación con el objetivo de evaluar la criticidad.

La ecuación utilizada para obtener los datos en el formato de AMEF, es:

$$NPR = S \times O \times D$$

(1)

En donde,

S: severidad

O: ocurrencia

D: detección

En la próxima sección se presentan de manera estadística los datos obtenidos al aplicar la herramienta AMEF a la cizalla, el esmeril de banco y el motor trifásico.

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos al aplicar el Análisis Modal de Efectos y Fallos (AMEF) a los casos de estudio se reflejan a través del Número Prioritario de Riesgo (NPR). En esta sección, se presenta de manera general el valor numérico asociado.

En la Tabla 1 se presenta un resumen del valor NPR para los casos de estudio, ordenados de manera secuencial.

Tabla 2. NPR para los casos de estudio. Fuente: Autores

Caso de estudio	Elemento	NPR1	NPR2	Observación
Cizalla	Switch	250	90	Mejora
	Motor	40	40	
	Cuchillas	125	100	
Esmeril de banco	Interruptor	80	12	Mejora
	Motor	216	36	
	Piedra abrasiva	125	30	
Motor trifásico	Bobinado	180	20	Mejora
	Rotor	350	12	
	Placa de bornes	144	24	

Al analizar el NPR en estos casos de estudio, se obtienen valores significativos que reflejan la mejora. Es importante destacar que el método AMEF no solo permite la identificación y evaluación de las fallas, sino que también ofrece opciones para su posible mitigación. Sin embargo, no garantiza la ausencia de fallas en los casos estudiados.

En la figura 4, se observan los histogramas representativos de los datos obtenidos al aplicar AMEF a los tres casos de estudio.

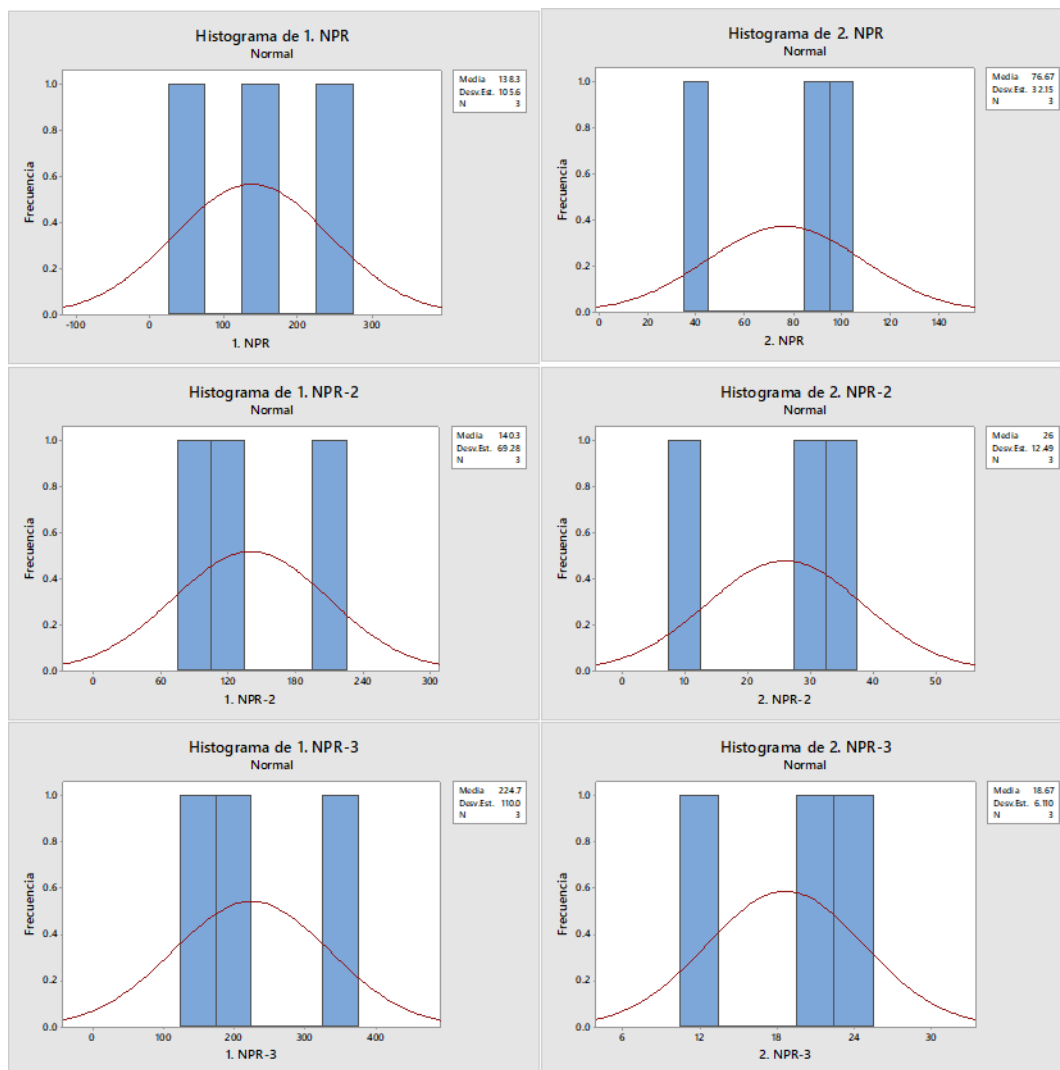


Figura 4. Histogramas de NPR. Fuente: Autores

En las gráficas de la figura 4, se puede apreciar que el motor trifásico presenta el mejor valor de desviación estándar en relación con los datos obtenidos de NPR. Esto indica que la herramienta de AMEF cumple su objetivo en este caso de estudio, al facilitar un análisis que conduce a una mejora en la mantenibilidad. Por otro lado, en los demás casos es necesario revisar con mayor detenimiento cada uno de los pasos del procedimiento AMEF y proporcionar retroalimentación para optimizar las condiciones de aplicación de este proceso.

5. Conclusiones

La aplicación de AMEF en motores trifásicos, como en el caso de una cizalla o un esmeril de banco, permite identificar de manera efectiva los modos de falla potenciales y sus efectos en el rendimiento del equipo. Este enfoque proactivo facilita la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, aumentando la fiabilidad y la vida útil de los motores. Además, al priorizar las acciones correctivas basadas en el riesgo, se optimizan los recursos y se minimizan tiempos de inactividad.

La evaluación de los casos de estudio en relación con el Núcleo de Progreso del Rendimiento (NPR) muestra una tendencia generalizada de mejora en todos los elementos analizados. En el caso de la cizalla, se observan incrementos significativos en la eficiencia de componentes clave como el motor y las cuchillas. Similarmente, el esmeril de banco exhibe notables incrementos en la efectividad del motor y la piedra abrasiva, mientras que el motor trifásico presenta una mejora clara en el bobinado y el rotor. Estos resultados sugieren que las intervenciones realizadas han sido exitosas en optimizar el rendimiento de cada uno de los equipos estudiados, lo que podría traducirse en un aumento de la productividad y la eficacia operativa en el contexto correspondiente. Sin olvidar que aún se tiene que trabajar para mejorar las condiciones estadísticas que permiten enriquecer la aplicación de estas herramientas en casos de estudio particulares.

6. Bibliografía

1. Ortega O., Vargas A., Martínez A., “Aplicación del Análisis del Modo y Efecto de Falla para la disposición adecuada del manejo químico y condiciones de seguridad industrial”, *Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital*. Vol. 16, no. 3, 2024.
2. Castillo S., Michalus J. “Aplicación de la herramienta de análisis del modo de fallas y efectos en cadenas de suministro agroindustriales de pequeña escala”, *Visión de Futuro*, Vol. 27, no. 1, pp. 199-223. 2023.

3. Malvarez D. "Implementación del análisis modal de fallos y efectos (AMFE) en el sector de la construcción", Universidad & Ciencia, Vol. 12, no, 1, pp. 118-127. 2023.

ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE FALLAS (A.M.E.F.)												Código: AMEF-142				
☐ DISEÑO ☐ PROCESO ☐ MEDIOS												Edición: Primera				
												Fecha: 10/12/18				
Cliente: Herrajería "El Chino"				Denominación producto: Motor eléctrico W21				Preparado por: Juan Sael Lozano								
Planta: Matriz				Referencia/s: https://www.vsm-group.com/fileadmin/content/pdf/Produkte_Komponente/Handbuecher/Download/bue_es.pdf				Revisado por: Néstor Navarro Vázquez								
Proveedores involucrados: Área de mantenimiento				Nivel de modificaciones cliente: Bajo				Aprobado por: Jesús Vicente González Sosa								
Descripción de la falla/Función/Característica	Modos potenciales de fallo	Efectos potenciales del fallo	Gravedad	Tipo	Causa(s) potencial(es) del fallo(s)	Gravedad	Verificación(s) y/o control(es) actual(es)	Detección n	NPE	Acción(es) recomendada(s)	Área(s) / persona(s) responsable(s) y fecha de realización	Resultado de las acciones				
												Acciones realizadas	Gravedad	Ocurrió	Detección	NPE
Bobinado	Bobinado quemado	Que el motor no funcione.	9	V	Mala conexión eléctrica.	4	No hay revisiones	5	180	Revisar periódicamente	Área de mantenimiento	Revisiones constantes en periodos cortos.	5	2	2	20
Ventilador	Mala lubricación	Exceso de temperatura	5	CS	Suciedad excesiva	2	Revisiones constantes cuando existe la falla	6	60	Revisión por parte del operador.	Área de mantenimiento	Mantenimiento preventivo	3	2	2	12
Carcasa	Desajuste	Algún golpe o mal posición	3	CI	Mal posicionamiento	1	No hay revisiones	5	15	Revisar periódicamente	Área de mantenimiento	Revisiones constantes en periodos cortos.	1	1	1	1
Estator	Desequilibrio de voltaje	Agotamiento de bobinado	8	CS	Corrosión y contaminación	2	Revisiones cuando existe la falla	6	96	Revisión por parte del operador.	Operador del equipo	Mantenimiento preventivo	4	3	2	24
Rotores	Instalación incorrecta	Tensión excesiva en los rodamientos	10	V	Estrés térmico	7	Revisiones cuando existe la falla y se detecta <i>may.</i>	5	350	Revisión y lubricación cada mes.	Área de mantenimiento	Mantenimiento preventivo	3	2	2	12
Rodamientos	Desajuste y contaminación	Humedad en los cojinetes	8	CS	Lubricación inadecuada	3	No hay revisiones	5	95	Revisar periódicamente	Área de mantenimiento	Mantenimiento preventivo	5	2	3	30
Placa de bornes	Caída de tensión	Que no funcione el motor	9	V	La red suministra una tensión muy baja	4	Revisión con el voltímetro	4	144	Medir la tensión de la red en el tablero.	Operador del equipo	Mantenimiento predictivo	4	3	2	24

Fórmulas para estimar los coeficientes de reacción de los contaminantes primario y secundario: aproximación lineal

Parra-Guevara, D., Skiba, Y. N.

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM

pdavid@atmosfera.unam.mx, skiba@unam.mx

1. Resumen

En este trabajo se considera un modelo de dispersión en la atmósfera tridimensional y bien formulado. El modelo está formado por dos ecuaciones acopladas y con condiciones de frontera para

una región acotada. La primera ecuación representa el transporte y reacción (lineal) de un contaminante primario y la segunda el transporte y reacción (lineal) del correspondiente contaminante secundario. La integración de la primera ecuación permite obtener una fórmula analítica para estimar el coeficiente de reacción del contaminante primario. La integración de la segunda ecuación conduce a una ecuación no-lineal cuyas soluciones representan el coeficiente de reacción del contaminante secundario para diferentes casos. Se prueba que tales soluciones se pueden calcular por el método de punto fijo.

2. Introducción

Los modelos de la calidad del aire se utilizan para pronosticar la concentración de sustancias contaminantes en una región de la atmósfera o para analizar diferentes estrategias de control de emisiones^[1]. El objetivo es estimar el riesgo en la población y proponer medidas de protección. Este tipo de modelos requiere información de las fuentes de emisión, de los parámetros que definen el estado de la atmósfera y los valores que determinan la velocidad de reacción de las sustancias contaminantes. Esta información se obtiene directamente como medidas de instrumentos, o indirectamente, mediante el uso de datos y técnicas auxiliares.

En este trabajo se describe un modelo lineal de dispersión y reacción para un contaminante primario y un contaminante secundario en una región acotada de la atmósfera. Dicho modelo es una aproximación lineal de la dispersión y reacción de algunos contaminantes del aire^[2] y tiene el objetivo de ser un auxiliar en la estimación de los coeficientes de reacción de dichas sustancias. La integración de este modelo conduce a una fórmula explícita para calcular el coeficiente de reacción del contaminante primario y una ecuación no-lineal cuya solución estima el coeficiente de reacción del contaminante secundario. Se prueba que tal solución se puede calcular por el método de punto fijo. Este método de estimación de parámetros sólo requiere de la medida indirecta, en un tiempo específico, de la masa del contaminante primario y secundario.

3. Modelo de dispersión

Se considera que la dispersión de un contaminante primario que se emite a la atmósfera desde una fuente fija se modela en un dominio $\mathbf{D}$, durante el intervalo de tiempo $(0, T)$, a través de la ecuación de transporte tridimensional:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha - \nabla \cdot (\mu \nabla \alpha) + \sigma \alpha = f(\mathbf{r}, t) \quad \text{en } \mathbf{D} \times (0, T) \quad (1)$$

Dicha ecuación toma en cuenta la distribución de emisión f de la fuente contaminante y varios procesos que influyen en la propagación de la sustancia en la atmósfera: la advección caracterizada

por la velocidad del viento $\mathbf{U}$, la transformación química del contaminante con una tasa de reacción σ y la turbulencia definida por un coeficiente de difusión μ . En caso de existir sedimentación del contaminante, la velocidad en la dirección vertical que caracteriza tal proceso se puede incorporar al campo de velocidad $\mathbf{U}$. La función $\alpha=\alpha(\mathbf{r},t)$ es una variable de estado que representa la concentración de la sustancia contaminante en cada punto $\mathbf{r}\in\mathbf{D}$ y cada instante $t\in(0,T)$. En la ecuación (1), los coeficientes $\mathbf{U}$ y μ se consideran funciones de la posición y el tiempo mientras que σ es una constante positiva, además, se asume que $\mathbf{U}$ satisface la ecuación de continuidad: $\text{div}(\mathbf{U})=0$. Con el fin de obtener una ecuación sencilla para estimar el coeficiente de reacción σ , se supone que inicialmente no hay contaminante primario en la atmósfera, $\alpha(\mathbf{r},0)=0$, y que el dominio $\mathbf{D}$ es suficientemente grande para contener toda la masa emitida durante el intervalo de tiempo $(0,T)$. Siempre es posible considerar tal dominio porque la distancia máxima, medida desde la fuente, que podría alcanzar una partícula que ha sido emitida es aproximadamente $T \max\{\|\mathbf{U}\|\}$. En la frontera de este dominio es posible asumir la ausencia del contaminante y un flujo de masa nulo, y por lo tanto, usar las condiciones siguientes:

$$\alpha \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{y} \quad \nabla \alpha \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{en} \quad \partial \mathbf{D} \quad (2)$$

Donde $\mathbf{n}$ denota el vector exterior, normal y unitario, sobre la frontera del dominio $\mathbf{D}$. Note que en la parte de la frontera que corresponde al suelo se cumplen ambas condiciones definidas en (2), ya que el viento es tangente al suelo y no hay flujo de masa a través de tal superficie.

Por otra parte, hay que notar que el término $\sigma\alpha$ representa la tasa de generación de masa del contaminante secundario que se forma a partir del contaminante primario, es decir, $\sigma\alpha$ es el término fuente para el contaminante secundario. Tal sustancia se transporta en la atmósfera debido a los mismos procesos físicos que propagan el contaminante primario. De esta forma, la ecuación que modela la concentración $\beta=\beta(\mathbf{r},t)$ del contaminante secundario, en cada punto $\mathbf{r}\in\mathbf{D}$ y cada instante $t\in(0,T)$, es la siguiente:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \beta - \nabla \cdot (\mu \nabla \beta) + \eta \beta = \sigma \alpha(\mathbf{r},t) \quad \text{en} \quad \mathbf{D} \times (0,T) \quad (3)$$

El coeficiente positivo η , en la ecuación (3), representa la tasa de reacción química del contaminante secundario en la atmósfera. De forma similar a las condiciones de frontera utilizadas para el contaminante primario, se asumen las siguientes condiciones para el contaminante secundario:

$$\beta \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{y} \quad \nabla \beta \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{en} \quad \partial \mathbf{D} \quad (4)$$

Donde $\mathbf{n}$ denota el vector exterior, normal y unitario, sobre la frontera del dominio $\mathbf{D}$. También en este

caso se asume la condición inicial $\beta(\mathbf{r},0)=0$, es decir, se supone que en el instante $t=0$ no hay contaminante secundario en la atmósfera. Las ecuaciones (1) a (4), junto con las condiciones iniciales nulas para ambos contaminantes, son el modelo de dispersión (lineal) en la atmósfera que se utiliza para obtener las estimaciones de los coeficientes de reacción σ y η . Note que las ecuaciones (1) y (3) están acopladas.

Se muestra ahora que este modelo de dispersión está bien formulado, es decir, que las soluciones α y β son únicas y estables respecto de pequeñas variaciones en las condiciones iniciales y forzamientos. Para tal efecto, se define el operador A en la siguiente forma:

$$A\alpha = \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha - \nabla \cdot (\mu \nabla \alpha) + \sigma \alpha ,$$

y probamos que este es un operador definido positivo respecto del producto interior en el espacio $L_2(\mathbf{D})$. En efecto, multiplicando la ecuación anterior por α e integrando en el dominio $\mathbf{D}$, se obtiene:

$$(\alpha, A\alpha) = \int_{\mathbf{D}} \alpha \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha d\mathbf{r} - \int_{\mathbf{D}} \alpha \nabla \cdot (\mu \nabla \alpha) d\mathbf{r} + \int_{\mathbf{D}} \sigma \alpha^2 d\mathbf{r}, \text{ donde } (\zeta, \varphi) = \int_{\mathbf{D}} \zeta \varphi d\mathbf{r} .$$

Ya que $\text{div}(\mathbf{U})=0$ se tiene que

$$\alpha \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha = \frac{1}{2} \nabla \cdot (\alpha^2 \mathbf{U}) .$$

Además,

$$\alpha \nabla \cdot (\mu \nabla \alpha) = \nabla \cdot (\alpha \mu \nabla \alpha) - \mu |\nabla \alpha|^2 .$$

Sustituyendo las dos últimas ecuaciones en el lado derecho de la definición del producto $(\alpha, A\alpha)$, utilizando el teorema de la divergencia^[3] en las dos primeras integrales del lado derecho, y considerando las condiciones de frontera definidas en (2), concluimos que

$$(\alpha, A\alpha) = \int_{\mathbf{D}} \mu |\nabla \alpha|^2 d\mathbf{r} + \int_{\mathbf{D}} \sigma \alpha^2 d\mathbf{r} > 0 ,$$

es decir, A es un operador positivo. Note que un argumento similar para el contaminante secundario permite concluir que $(\beta, A\beta) > 0$.

Ahora, multiplicando la ecuación (1) por α , e integrando en el dominio $\mathbf{D}$, obtenemos:

$$\left(\alpha, \frac{\partial \alpha}{\partial t}\right) + (\alpha, A\alpha) = (\alpha, f).$$

Esta última ecuación se reescribe en la forma:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathbf{D}} \alpha^2 d\mathbf{r} = (\alpha, f) - (\alpha, A\alpha).$$

Ya que

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathbf{D}} \alpha^2 d\mathbf{r} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \|\alpha\|^2 = \|\alpha\| \frac{\partial}{\partial t} \|\alpha\|, \text{ donde } \|\alpha\| = \left(\int_{\mathbf{D}} \alpha^2 d\mathbf{r} \right)^{1/2},$$

y considerando que el operador A es positivo, se concluye de la penúltima ecuación que

$$\|\alpha\| \frac{\partial}{\partial t} \|\alpha\| \leq (\alpha, f).$$

Aplicando la desigualdad de Schwarz^[3] en el lado derecho de la última ecuación, y eliminando en ambos lados de la desigualdad resultante el término $\|\alpha\|$, se obtiene que

$$\frac{\partial}{\partial t} \|\alpha\| \leq \|f\|.$$

Integrando sobre el intervalo $(0,t)$ en ambos lados de esta desigualdad, se obtiene

$$\|\alpha(\mathbf{r},t)\| - \|\alpha(\mathbf{r},0)\| \leq \int_0^t \|f\| dt, \quad t \leq T.$$

Finalmente, acotando la integral del lado derecho de esta desigualdad, obtenemos la siguiente estimación para el contaminante primario:

$$\|\alpha(\mathbf{r},t)\| \leq \|\alpha(\mathbf{r},0)\| + T \max_{0 \leq t \leq T} \|f\|, \quad t \leq T \quad (5)$$

Un desarrollo similar a partir de la ecuación para el contaminante secundario (ecuación (3)), permite obtener la siguiente desigualdad:

$$\frac{\partial}{\partial t} \|\beta\| \leq \sigma \|\alpha\|.$$

Utilizando la ecuación (5) se tiene que

$$\frac{\partial}{\partial t} \|\beta\| \leq \sigma \|\alpha(\mathbf{r},0)\| + \sigma T \max_{0 \leq t \leq T} \|f\|.$$

Integrando sobre el intervalo $(0,t)$ en ambos lados de la última desigualdad, y acotando las integrales respectivas en el lado derecho, se obtiene la estimación para el contaminante secundario:

$$\|\beta(\mathbf{r},t)\| \leq \|\beta(\mathbf{r},0)\| + \sigma T \|\alpha(\mathbf{r},0)\| + \sigma T^2 \max_{0 \leq t \leq T} \|f\|, \quad t \leq T \quad (6)$$

Las ecuaciones (5) y (6) establecen que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales y el

forzamiento f implican pequeños cambios en las soluciones α y β , es decir, el modelo de dispersión es estable. Además, ya que el modelo de dispersión es lineal, las ecuaciones (5) y (6) permiten establecer que las soluciones α y β son únicas. Note que en la deducción de las estimaciones (5) y (6) no se utilizaron las condiciones iniciales nulas para los contaminantes primario y secundario, esto con el fin de obtener ecuaciones más generales.

4. Ecuaciones para estimar los coeficientes de reacción σ y η

Al integrar la ecuación (1) en el dominio $\mathbf{D}$, y simplificar a través de la ecuación de continuidad y el teorema de la divergencia, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathbf{D}} \alpha d\mathbf{r} + \int_{\partial\mathbf{D}} (\alpha \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} - \mu \nabla \alpha \cdot \mathbf{n}) dS + \sigma \int_{\mathbf{D}} \alpha d\mathbf{r} = \int_{\mathbf{D}} f(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad (7)$$

Aplicando las condiciones de frontera (2) en la ecuación (7) se obtiene que

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathbf{D}} \alpha d\mathbf{r} + \sigma \int_{\mathbf{D}} \alpha d\mathbf{r} = \int_{\mathbf{D}} f(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad (8)$$

Si se definen las variables m y Q en la forma

$$m(t) = \int_{\mathbf{D}} \alpha d\mathbf{r} \quad \text{y} \quad Q(t) = \int_{\mathbf{D}} f(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r},$$

entonces la ecuación (8) se reduce al siguiente problema de valor inicial:

$$\frac{\partial}{\partial t} m(t) + \sigma m(t) = Q(t), \quad m(0) = 0 \quad (9)$$

Donde $m(t)$ es la masa total emitida por la fuente hasta el instante t , con excepción de la porción de masa del contaminante primario que se ha transformado en el mismo periodo, y $Q(t)$ es la tasa de

emisión de la fuente contaminante. Note que la condición $m(0)=0$ es resultado de la condición inicial nula para el contaminante primario. Con el fin de resolver el problema (9), se multiplica la ecuación diferencial por el factor integrante $e^{\sigma t}$, y el resultado se simplifica como

$$\frac{\partial}{\partial t} \{e^{\sigma t} m(t)\} = e^{\sigma t} Q(t) \quad (10)$$

Integrando la ecuación (10) en el intervalo $(0,t)$, con $t \leq T$, y despejando la variable m , se obtiene

$$m(t) = e^{-\sigma t} \int_0^t e^{\sigma \tau} Q(\tau) d\tau = \int_0^t Q(\tau) e^{-\sigma(t-\tau)} d\tau \quad (11)$$

Es importante notar que la ecuación (11) establece una relación explícita entre la variable de estado m y los parámetros Q y σ . Tal relación se puede utilizar para hacer estimaciones indirectas de dichos parámetros cuando se tiene información adicional de la variable de estado.

En efecto, supongamos que se observa una fuente de emisión puntual e instantánea, es decir,

$$f(\mathbf{r}, t) = m_0 \delta(t) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \quad (12)$$

Aquí, δ denota la función delta de Dirac, $\mathbf{r}_0$ representa el punto donde se ubica la fuente que emite el contaminante primario, y m_0 denota la masa que se emite en el sitio $\mathbf{r}_0$ al tiempo $t=0$. Suponemos que dichos parámetros se conocen, ya que se puede realizar un experimento controlado con el fin de estimar la tasa de reacción σ . En este caso

$$Q(t) = \int_{\mathbf{D}} f(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} = m_0 \delta(t), \text{ ya que } \int_{\mathbf{D}} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) d\mathbf{r} = 1 \quad (13)$$

y la ecuación (11) se reduce a la siguiente expresión:

$$m(t) = m_0 e^{-\sigma t}, \text{ ya que } \int_0^t e^{-\sigma(t-\tau)} \delta(\tau) d\tau = e^{-\sigma t} \quad (14)$$

Al considerar $t=T$ en la ecuación de la masa m (ecuación (14)), y despejando el parámetro σ de la ecuación resultante, se obtiene la siguiente ecuación para estimar el coeficiente de reacción del contaminante primario:

$$\sigma = \frac{1}{T} \text{Ln} \left\{ \frac{m_0}{m(T)} \right\} \quad (15)$$

La ecuación (15) determina el parámetro σ cuando se tiene una estimación indirecta de la masa del contaminante primario, para un tiempo específico, en el dominio $\mathbf{D}$. Tal medida de la masa ($m(T)$) se puede obtener, por ejemplo, a través de una imagen de satélite^[4, 5].

Por otra parte, al integrar la ecuación (3) en el dominio $\mathbf{D}$, y simplificar a través de la ecuación de continuidad y el teorema de la divergencia, se obtiene la siguiente ecuación para el contaminante secundario:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathbf{D}} \beta d\mathbf{r} + \int_{\partial\mathbf{D}} (\beta \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} - \mu \nabla \beta \cdot \mathbf{n}) ds + \eta \int_{\mathbf{D}} \beta d\mathbf{r} = \int_{\mathbf{D}} \sigma \alpha(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad (16)$$

Aplicando las condiciones de frontera (4) en la ecuación (16) se obtiene que

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathbf{D}} \beta d\mathbf{r} + \eta \int_{\mathbf{D}} \beta d\mathbf{r} = \int_{\mathbf{D}} \sigma \alpha(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} \quad (17)$$

Si se definen las variables M y m en la forma

$$M(t) = \int_{\mathbf{D}} \beta d\mathbf{r} \quad \text{y} \quad m(t) = \int_{\mathbf{D}} \alpha d\mathbf{r} ,$$

entonces la ecuación (17) se reduce al siguiente problema de valor inicial:

$$\frac{\partial}{\partial t} M(t) + \eta M(t) = \sigma m(t), \quad M(0) = 0 \quad (18)$$

Aquí, m denota la masa del contaminante primario y M es la masa del contaminante secundario. La condición $M(0)=0$ se obtiene de la condición inicial nula para el contaminante secundario.

El problema de valor inicial (18) se resuelve en forma similar al problema (9). En este caso se usa el factor integrante $e^{\eta t}$, con lo cual se obtiene la siguiente ecuación para estimar la masa del contaminante secundario:

$$M(t) = \sigma e^{-\eta t} \int_0^t e^{\eta \tau} m(\tau) d\tau \quad (19)$$

Sustituyendo la expresión de la masa m (ecuación (14)) en la ecuación (19), se obtiene:

$$M(t) = \sigma m_0 e^{-\eta t} \int_0^t e^{(\eta-\sigma)\tau} d\tau \quad (20)$$

Se procede ahora al análisis de la ecuación (20).

Caso $\eta=\sigma$. En esta situación la ecuación (15) determina el coeficiente η y la ecuación (20) establece condiciones para que se cumpla este caso. En efecto, ya que la ecuación (20) se reduce a la expresión:

$$M(t) = \sigma m_0 e^{-\sigma t} t,$$

o bien, considerando la última ecuación para $t=T$, se tiene que:

$$M(T) = \sigma m_0 e^{-\sigma T} T \quad (21)$$

Además, de la ecuación (15) tenemos que $m(T)=m_0e^{-\sigma T}$, por lo tanto, la ecuación (21) se reduce a la siguiente expresión:

$$M(T) = \sigma T m(T).$$

Finalmente,

$$\sigma = \frac{M(T)}{Tm(T)} \quad (22)$$

Donde $M(T)$ representa una medida indirecta del contaminante secundario en la región **D** al tiempo $t=T$. Tal medida de la masa ($M(T)$) se puede obtener, por ejemplo, a través de una imagen de satélite^[4, 5].

Es importante notar que la ecuación (22) es una condición necesaria para este caso, por lo tanto, cuando el valor de σ calculado con la ecuación (22) no coincide con el valor que se obtiene de la ecuación (15) entonces se concluye que $\eta \neq \sigma$.

Caso $\eta \neq \sigma$. En esta situación, al calcular la integral que aparece en la ecuación (20) y simplificar, obtenemos la siguiente ecuación para $M(t)$:

$$M(t) = \frac{\sigma}{\sigma - \eta} m_0 e^{-\sigma t} (e^{(\sigma - \eta)t} - 1).$$

Esta última ecuación se considera al instante $t=T$, y también que $m(T)=m_0e^{-\sigma T}$ (ecuación (15)), con lo cual se obtiene la siguiente ecuación no-lineal para la incógnita η :

$$M(T) = \frac{\sigma}{\sigma - \eta} m(T) (e^{(\sigma - \eta)T} - 1) \quad (23)$$

En la ecuación (23), $m(T)$ y $M(T)$ representan medidas indirectas de la masa del contaminante primario y secundario, en la región **D** y al tiempo $t=T$, respectivamente. La solución de la ecuación (23) es el

coeficiente de reacción del contaminante secundario en la atmósfera. Con el fin de analizar dicha solución, la ecuación (23) se escribe como una ecuación de punto fijo^[6]. Para tal efecto, introducimos la nueva variable $x=\sigma\eta$, y obtenemos:

$$x = g(x), \text{ con } g(x) = \sigma \frac{m(T)}{M(T)} (e^{xT} - 1) \quad (24)$$

De esta forma, la solución de la ecuación (23) se busca como la intersección de la gráfica de la función g con la gráfica de la función identidad. Note que para la función g se tiene que

$$g(0) = 0, \quad g'(0) = \sigma T \frac{m(T)}{M(T)} \quad \text{y} \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} g(x) = -\sigma \frac{m(T)}{M(T)} \quad (25)$$

Consideramos ahora el caso $g'(0)=\sigma Tm(T)/M(T)>1$. En la Figura 1 se presenta la situación típica de este caso: en la parte negativa del eje 'x', la gráfica de g (línea azul), siguiendo su recta tangente en $x=0$ (línea amarilla), pasa por debajo de la gráfica de la función identidad (línea roja). Luego, la gráfica de la función g tiende hacia su asíntota horizontal (ver límite en la ecuación (25)), y cruza necesariamente la gráfica de la función identidad en el punto $x^*<0$. El punto x^* es la solución de la ecuación (24). Se concluye que cuando $\sigma Tm(T)/M(T)>1$ entonces la solución η de la ecuación (23) existe y es única, además $\eta>\sigma$. Para calcular x^* se aplica el algoritmo de punto fijo^[6], $x_{n+1}=g(x_n)$, iniciando en cualquier valor $x_0<0$. La sucesión que se genera sigue el patrón de flechas: gráfica de g ->gráfica de la identidad->gráfica de g ->gráfica de la identidad, etc. En la Figura 1 las flechas trazadas en color negro muestran la convergencia de la sucesión x_n hacia x^* .

En la Figura 2 (A) se muestra la situación típica del caso $g'(0)=\sigma Tm(T)/M(T)<1$. En la parte positiva del eje 'x', la gráfica de g (línea azul), siguiendo su recta tangente en $x=0$ (línea amarilla), pasa por debajo de la gráfica de la función identidad (línea roja). Luego, la gráfica de la función g crece más rápido que cualquier polinomio (función exponencial), y cruza necesariamente la gráfica de la función identidad en el punto $x^*>0$. El punto x^* es la solución de la ecuación (24). Se concluye que cuando $\sigma Tm(T)/M(T)<1$ entonces la solución η de la ecuación (23) existe y es única, además $\eta<\sigma$. En este caso la función de iteración g no genera una sucesión convergente a x^* (ver flechas en color negro en la Figura 2 (A)). Por tal motivo, la ecuación de punto fijo (24) se escribe de una forma equivalente a través de una nueva función de iteración h (ecuación (26)). La Figura 2 (B) muestra las iteraciones $x_{n+1}=h(x_n)$, en forma de flechas de color negro, las cuales convergen a x^* para cualquier condición inicial $x_0>0$.

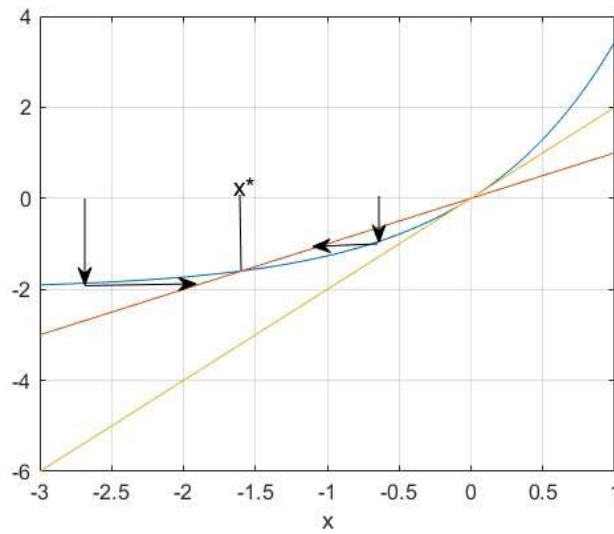


Figura 1. Gráfica de la función identidad (rojo), función g (azul) y recta tangente de g en $x=0$ (amarillo) para el caso $g'(0)>1$.

$$x = h(x), \text{ con } h(x) = \frac{1}{T} \log \left(\frac{M(T)}{\sigma m(T)} x + 1 \right) \quad (26)$$

Note que $h'(0) = [\sigma T m(T)/M(T)]^{-1} = [g'(0)]^{-1}$, y ya que $g'(0) < 1$, entonces $h'(0) > 1$. Por esta razón la recta tangente de h en $x=0$ (línea amarilla) está por encima de la gráfica de la función identidad (ver Figura 2 (B)).

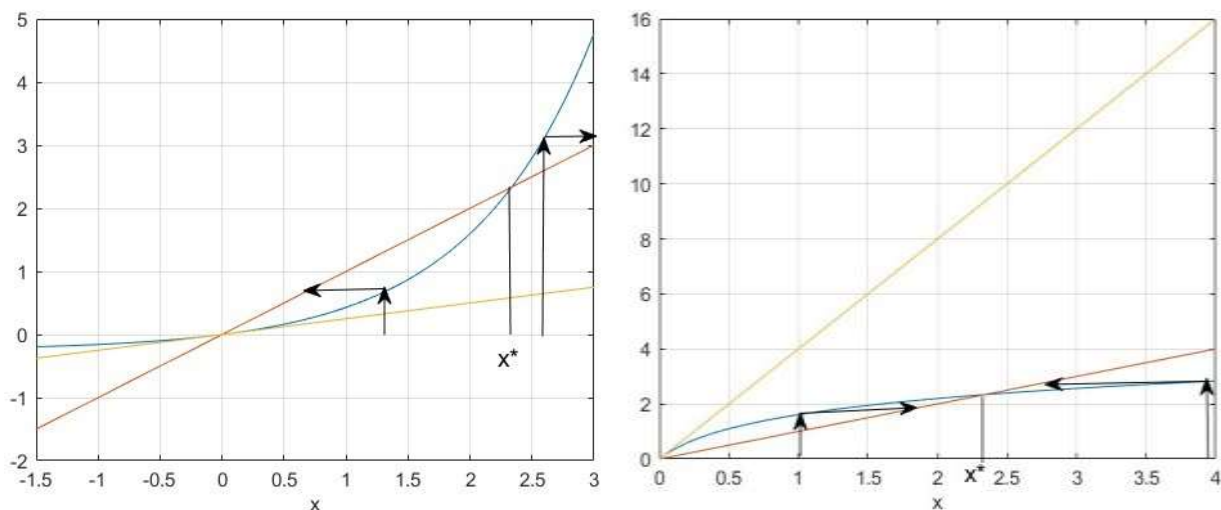


Figura 2. Izquierda-A) Gráfica de la función identidad (rojo), función g (azul) y recta tangente de g en $x=0$ (amarillo) para el caso $g'(0)<1$. Derecha-B) Iteraciones del algoritmo de punto fijo (flechas negras) con la función h (línea azul).

5. Conclusiones

El análisis desarrollado en este trabajo muestra que a través del modelo lineal de dispersión es posible obtener estimaciones del coeficiente de reacción química tanto del contaminante primario como del contaminante secundario. Para calcular el coeficiente del contaminante primario se aplica una fórmula explícita (ecuación (15)). El coeficiente del contaminante secundario se obtiene resolviendo una ecuación de punto fijo (ecuaciones 24 y 26). Se mostró que el algoritmo de punto fijo es convergente. Los datos que requieren las fórmulas obtenidas son estimaciones indirectas, en un tiempo específico, de la masa del contaminante primario y la masa del contaminante secundario.

6. Bibliografía

1. Skiba Y.N. y D. Parra-Guevara. "Mathematical Methods for the Assessment and Control of Industrial Emissions". Springer, 2024.
2. <https://link.springer.com/book/9783031581083>.
3. Gough C. A., M. J. Chadwick, B. Biewald, J. Kyleneiterna, P. D. Bailey y S. Cinderby. Developing Optimal Abatement Strategies for the Effects of Sulphur and Nitrogen Deposition at European Scale. Water, Air and Soil Pollution, 85 (4), 2601-2606 (1995).
4. Fuls, W., "Advanced Calculus- An Introduction to Analysis". John Wiley & Sons, 3rd Edition, 2016.

5. Park S., M. Shin, J. Im, C-K Song, M. Choi, J. Kim, S. Lee, R. Park, J. Kim, D-W Lee y S-K Kim. Estimation of Ground-Level Particulate Matter Concentrations Through the Synergistic Use of Satellite Observations and Process-Based Models Over South Korea. *Atmos. Chem. Phys.*, EGU, V. 19, 1097-1113 (2019).
6. Saleh S. y G. Hasan. Estimation of PM10 Concentration Using Ground Measurements and Landsat 8 OLI Satellite Image. *J. Geophys. Remote Sens.*, V. 3, No. 2, 1-6 (2014).
7. Moursund, D. G. y C. S. Duris. "Elementary Theory and Applications of Numerical Analysis". Dover, 1988.

Estabilidad Turnpike en un Modelo Estocástico Controlado de Lotka-Volterra

Romero-Meléndez, C.¹, Loreto Guerrero, L. F.¹

¹Departamento de Ciencias Básicas. Universidad Autónoma Metropolitana., Mexico

cutberto@azc.uam.mx, al2182000471@azc.uam.mx

Resumen: Se estudia un modelo estocástico y controlado de Lotka-Volterra para un depredador y dos presas. Se plantea un problema de Control Óptimo para este modelo, el cual se enfoca desde la teoría de Control Geométrico. A través de la definición de un Hamiltoniano y utilizando el Principio del Máximo de Pontryagin para el caso estocástico, se demuestra que el modelo presenta un tipo de estabilidad llamada propiedad de Turnpike, la cual consiste en que sus soluciones permanecen, durante la mayor parte del tiempo, cercanas a la solución estacionaria del sistema. Se resuelve numéricamente el sistema, cuya solución analítica no puede determinarse. Se realizan algunas simulaciones numéricas para el modelo.

Palabras clave: Modelo de Lotka-Volterra, control óptimo estocástico, procesos de Wiener.

1.Introduction

Los sistemas de Lotka-Volterra son considerados uno de los modelos más importantes para describir la dinámica de poblaciones en competencia. Estos modelos permiten estudiar adecuadamente los fenómenos de persistencia, extinción, estabilidad de soluciones y ciclos límite, [4-9]. Introduciendo funciones de control en el sistema, que permitan moderar el crecimiento de las especies, es posible establecer un problema de control óptimo, para llevar al sistema de una configuración dada a otra cualquiera. Para

que el modelo sea más realista, pueden considerarse adicionalmente fluctuaciones ambientales aleatorias, representadas por procesos estocásticos como los procesos de Wiener.

2. Formulación del Problema

El modelo en su forma general es un proceso de difusión controlado, el cual está dado por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias estocásticas con condiciones iniciales y finales:

$$dx = f(t, x(t), u(t))dt + g(t, x(t), u(t))dW(t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_1(0) &= x_{10}, & x_2(0) &= x_{20}, & x_3(0) &= x_{30}, \\ x_1(T) &= x_{11}, & x_2(T) &= x_{21}, & x_3(T) &= x_{31}, \end{aligned} \quad (2)$$

donde $f : [0, T] \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, dada por

$$f(t, x, u) = (f^1(t, x, u), f^2(t, x, u), f^3(t, x, u))^T, \quad (3)$$

es una función medible llamada deriva, el proceso $u : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$,

$$u(t) = (u_1(t), u_2(t), u_3(t)), \quad (4)$$

es una función medible y acotada llamada control, que pertenece a una region $U \in \mathbb{R}^3$ y es una función adaptada y cadlag (continua por la derecha y con límite por la izquierda), y $g(t, x, u)$ es medible y definida también en $[0, T] \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3$ y $\mathbb{R}^{3 \times 3}$ -valuada (es decir una matriz real 3×3),

$$g(t, x, u) = (g^1(t, x, u), g^2(t, x, u), g^3(t, x, u)), \quad (5)$$

donde

$$g^j(t, x, u) = \left(g^{1j}(t, x, u), g^{2j}(t, x, u), g^{3j}(t, x, u) \right)^T, 1 \leq j \leq 3, \quad (6)$$

la cual es llamada coeficiente de difusión.

En nuestro caso se consideran las funciones $f(t, x(t), u(t)), g(t, x(t), u(t))$:

$$f(t, x, h) = \begin{pmatrix} \eta x_1(t) - \beta x_1(t)x_2(t) - \delta x_1(t)x_3(t) - A_1 x_1(t)u_1(t) \\ \omega x_2(t) - \beta x_2(t)x_1(t) - \epsilon x_2(t)x_3(t) - A_2 x_2(t)u_2(t) \\ -\kappa x_3(t) - \delta x_3(t)x_1(t) - \epsilon x_3(t)x_2(t) - A_3 x_3(t)u_3(t) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$g(t, x, u) = \begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

con η, ω, κ constantes positivas en $(0, 1]$, representando las tasas de crecimiento intrínseco de las dos presas y el depredador, respectivamente, β, δ, η y ϵ en $(0, 1]$, son constantes positivas que representan las tasas de contacto por unidad de tiempo entre presa-presa, depredador-primera presa y depredador-segunda presa, respectivamente. Los controles $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$ representan, por ejemplo, la caza de algunas especies y se ha modulado el efecto de estos controles con constantes $A_1, A_2, A_3 \in (0, 1]$. Con el fin de tomar en cuenta variaciones ambientales aleatorias en el ambiente y su repercusión en las poblaciones de presas y depredadores se han introducido tres procesos estandar de Wiener, independientes entre sí, $W_1(t), W_2(t), W_3(t)$ con parámetros $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in (0, 1]$, respectivamente, definidos en un espacio de probabilidad $(\Omega, \mathcal{F}, P)$.

El Problema de Control Óptimo

Se establece el siguiente Problema de Control Óptimo:

Encontrar controles $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$ en el sistema

$$\begin{aligned} dx_1(t) &= \eta x_1(t) - \beta x_1(t)x_2(t) - \delta x_1(t)x_3(t) - A_1 x_1(t)u_1(t) + \alpha_1 dW_1, \\ dx_2(t) &= \omega x_2(t) - \beta x_2(t)x_1(t) - \epsilon x_2(t)x_3(t) - A_2 x_2(t)u_2(t) + \alpha_2 dW_2, \\ dx_3(t) &= -\kappa x_3(t) - \delta x_3(t)x_1(t) - \epsilon x_3(t)x_2(t) - A_3 x_3(t)u_3(t) + \alpha_3 dW_3, \end{aligned}$$

Con las condiciones

$$x_1(0) = x_{10}, x_2(0) = x_{20}, x_3(0) = x_{30}, x_1(T) = x_{11}, x_2(T) = x_{21}, x_3(T) = x_{31},$$

que minimicen el siguiente costo funcional en su forma de Lagrange

$$J(u_1(t), u_2(t), u_3(t)) = E \left[\int_0^T (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) dt \right] \quad (9)$$

Se define el Hamiltoniano generalizado $H(x(t), p(t), q(t), u(t))$ como sigue:

$$\begin{aligned} H(x, p, q, u) = & \eta x_1 p_1 - \beta p_1 x_1 x_2 - \delta p_1 x_1 x_3 - A_1 p_1 x_1 u_1 + \omega p_2 x_2 \\ & - \beta p_2 x_2 x_1 - \epsilon p_2 x_2 x_3 - A_2 p_2 x_2 u_2 - \kappa p_3 x_3 \\ & - \delta p_3 x_3 x_1 - \epsilon p_3 x_3 x_2 - A_3 p_3 x_3 u_3 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (x_i^2 + u_i^2 - 2\alpha_i q_{ii}) \end{aligned} \quad (10)$$

en donde las variables adjuntas $p(t), q(t)$ derivan del Principio del Máximo de Pontryagin Estocástico y satisfacen:

$$\begin{aligned} dp_1(t) = & (-\eta p_1(t) + \eta x_1(t) + \beta p_1(t) x_2(t) + \delta p_1(t) x_3(t) + A_1 p_1(t) u_1(t) \\ & + \beta p_2(t) x_2(t) - \delta p_3(t) x_1(t)) dt + \sum_{i=1}^3 q_{1i} dW_1 \\ dp_2(t) = & (-\omega p_2(t) + \omega x_2(t) - \beta p_2(t) x_1(t) + \epsilon p_2(t) x_3(t) + A_2 p_2(t) u_2(t) \\ & + \beta p_1(t) x_2(t) - \epsilon p_3(t) x_1(t)) dt + \sum_{i=1}^3 q_{2i} dW_2 \\ dp_3(t) = & (\kappa p_3(t) + \kappa x_3(t) - \delta p_3(t) x_1(t) - \epsilon p_3(t) x_2(t) + A_3 p_3(t) u_3(t) \\ & + \delta p_1(t) x_1(t) + \epsilon p_2(t) x_2(t)) dt + \sum_{i=1}^3 q_{3i} dW_3 \end{aligned} \quad (11)$$

También de él se obtienen las siguientes relaciones:

$$u_i = -A_i p_i x_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

Se tiene el siguiente resultado:

Teorema 1.

Dada la solución $(\bar{x}(t), \bar{p}(t), \bar{u}(t))$ del problema estacionario del sistema (1) y la solución $(x(t), p(t), u(t))$ del sistema (3) con el costo funcional (8), la solución del problema de control óptimo satisface la siguiente propiedad, llamada Propiedad Turnpike: existen constantes $C_1, C_2(t)$ tales que se cumple:

$$E \left[\|x(t) - \bar{x}(t)\|^2 \right] + E \left[\|p(t) - \bar{p}(t)\|^2 \right] + E \left[\|u(t) - \bar{u}(t)\|^2 \right] \leq C_2 e^{-2C_1(t-t_0)} \quad (12)$$

Demostración.

Se considera una perturbación de las variables $x(t), p(t), q(t), u(t)$ alrededor de la solución $(\bar{x}(t), \bar{p}(t), \bar{u}(t))$, del problema estacionario como sigue:

$$x(T) = \bar{x}(t) + \delta x(t)$$

$$u(T) = \bar{u}(t) + \delta u(t)$$

$$p(T) = \bar{p}(t) + \delta p(t)$$

$$q(T) = \bar{q}(t) + \varphi(t) \delta q(t)$$

Utilizando el Hamiltoniano perturbado y el Principio del Máximo se obtiene:

$$\delta u(t) = -H_{uu}^{-1}(H_{uu}\delta x(t) + H_{up}\delta p(t) + H_{uq}\delta q(t)\varphi(t))$$

$$\delta \ddot{x}(t) = (H_{px} - H_{pu}H_{uu}^{-1}H_{ux})\delta \dot{x}(t) - H_{pu}H_{uu}^{-1}H_{up}\delta \dot{p}(t) - H_{pu}H_{uu}^{-1}H_{uq}\delta \dot{q}(t)\varphi(t)$$

$$\begin{aligned}\delta \dot{p}(t) = & (H_{xx} - H_{xu}H_{uu}^{-1}H_{ux})\delta x(t) + (-H_{xu} + H_{pu}H_{uu}^{-1}H_{up})\delta p(t) - H_{xq} \\ & + H_{pu}H_{uu}^{-1}H_{uq}\delta q(t)\varphi(t)\end{aligned}$$

De acuerdo a [8], adaptado para nuestro sistema estocástico extendido, se definen las matrices:

$$A = H_{px} - H_{pu}H_{uu}^{-1}H_{ux}$$

$$R = -H_{xx} + H_{xu}H_{uu}^{-1}H_{ux}$$

$$B = H_{pu}$$

$$Z(T) = (\delta x(t), \delta p(t))^t$$

$$d\widehat{W} = (dW(t), dW(t))^t$$

con lo cual se tienen las matrices por bloques siguientes:

$$M = \begin{pmatrix} A & -BH_{uu}^{-1}B^t \\ R & -A^t \end{pmatrix}, Q = \begin{pmatrix} -BH_{uu}^{-1}B^t \\ -H_{px} + H_{xu}H_{uu}^{-1}H_{uq} \end{pmatrix}, Z_0 = \begin{pmatrix} x_T(0) - \bar{x} \\ p_T(0) - \bar{p} \end{pmatrix}$$

y se tiene el sistema lineal aproximado siguiente:

$$Z(T) = \widehat{M}Z(t)dt + QdW$$

$$Z(0) = Z_0$$

Ya que la matriz $\widehat{M}$ no depende de t , es posible expresar la solución del sistema anterior como:

$$Z(T) = e^{\widehat{M}(t-t_0)} Z_0 + \int_{t_0}^t e^{\widehat{M}(s-s_0)} Q d\widehat{W}$$

Enfocándonos en la parte determinista de la ecuación anterior, es posible acotar ese término definiendo la ecuación algebraica matricial de Riccati:

$$XA + A^t X - XBH_{uu}^{-1} B^t X - R = 0$$

cuya solución E_- . Además, es posible, (16), obtener una matriz diagonal equivalente a la matriz $\widehat{M}$, cuya diagonal superior es $A + BH_{uu}^{-1} B^t E_-$ y cuyos valores propios tienen parte real negativa. Si se define

$$C_1 = -\max\{\mu | \mu \in \text{Spec}(A + BH_{uu}^{-1} B^t E_-)\}$$

entonces tendremos:

$$||e^{\widehat{M}(t-t_0)}|| \leq e^{-C_1(t-t_0)}$$

y al aplicar la propiedad de isometría de Itô y la desigualdad de Schwarz

$$E[||Z(T)||^2] \leq 3(E[|e^{-C_1(t-t_0)} Z_0|^2] + E\left[\left|\int_{t_0}^t e^{\tilde{M}(s-s_0)} Q d\widehat{W}(s)\right|^2\right])$$

de donde

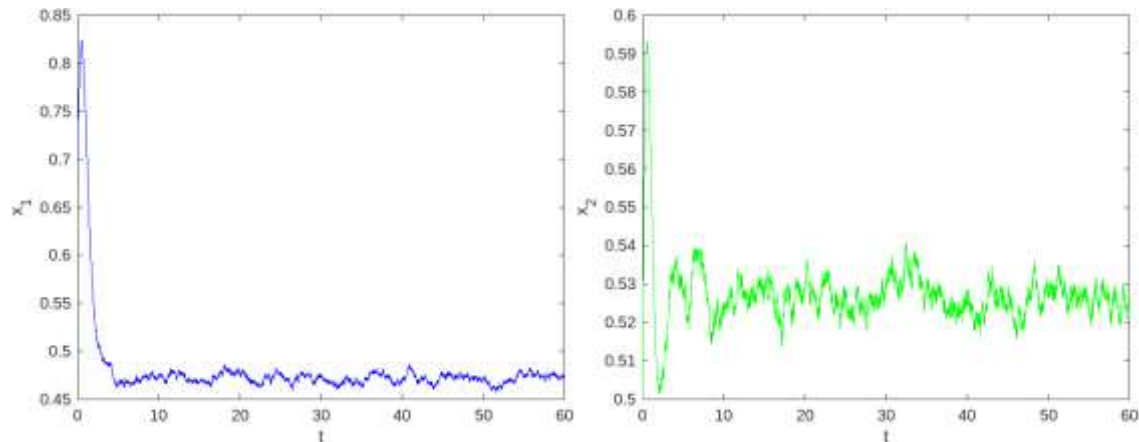
$$E[||Z(T)||^2] \leq 3e^{-C_1(t-t_0)}(|Z_0|^2 + \int_{t_0}^t E + \{||Q||^2\} ds))$$

Considerando la acotación de $|Z_0|$, de $|Q|$ y la desigualdad de Gronwall, resulta la existencia de C_2 , tal que se cumple la conclusión del teorema:

$$E[||Z(T)||^2] \leq C_2 e^{-C_1(t-t_0)}$$

3. Simulaciones numéricas.

Se realiza la integración estocástica del sistema (--), de manera numérica, utilizando el esquema de Runge-Kutta de orden 4. Se eligen los siguientes valores para los parámetros del sistema: $\eta = \beta = \delta = \omega = \epsilon = \kappa = 1$, $A_1 = 0.4$, $A_2 = 0.2$, y $A_3 = 0.5$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$. Las condiciones son: $x_1(0) = 0.7$, $x_2(0) = 0.5$, $x_3(0) = 0.6$, $p_1(T) = 0.5$, $p_2(T) = 0.5$, $p_3(T) = 0.5$, y $T=60$.



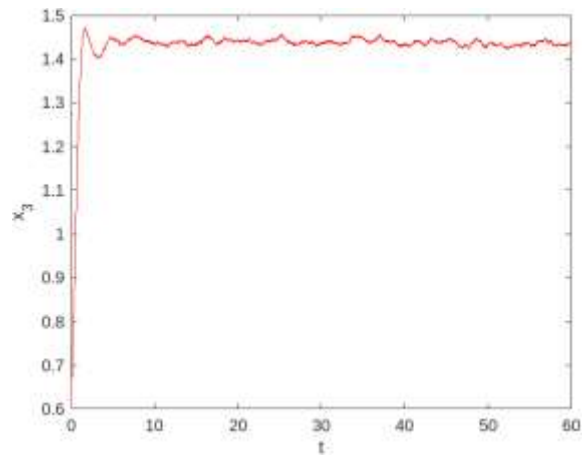


Figura 1. Estados óptimos $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$

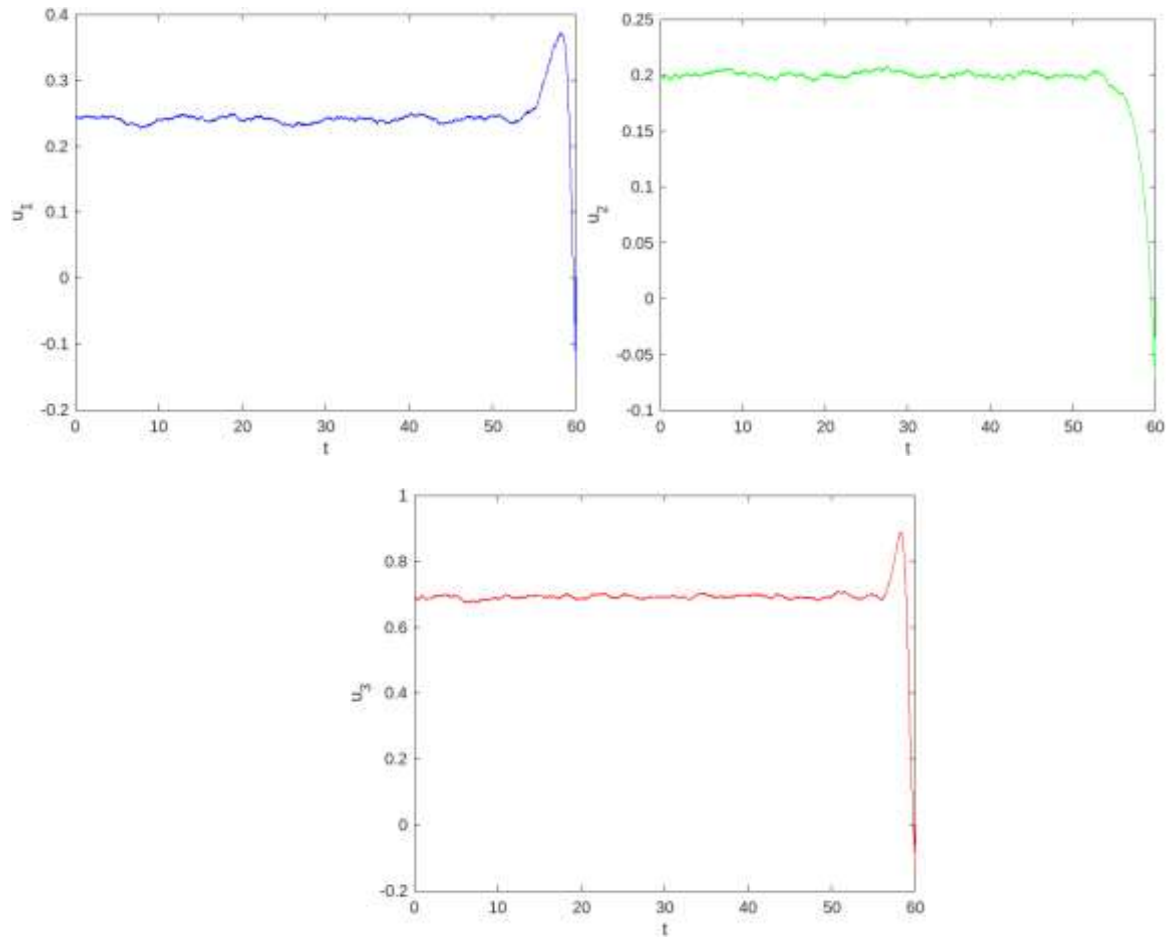


Figura 2. Controles óptimos $u(t), u_2(t), u_3(t)$

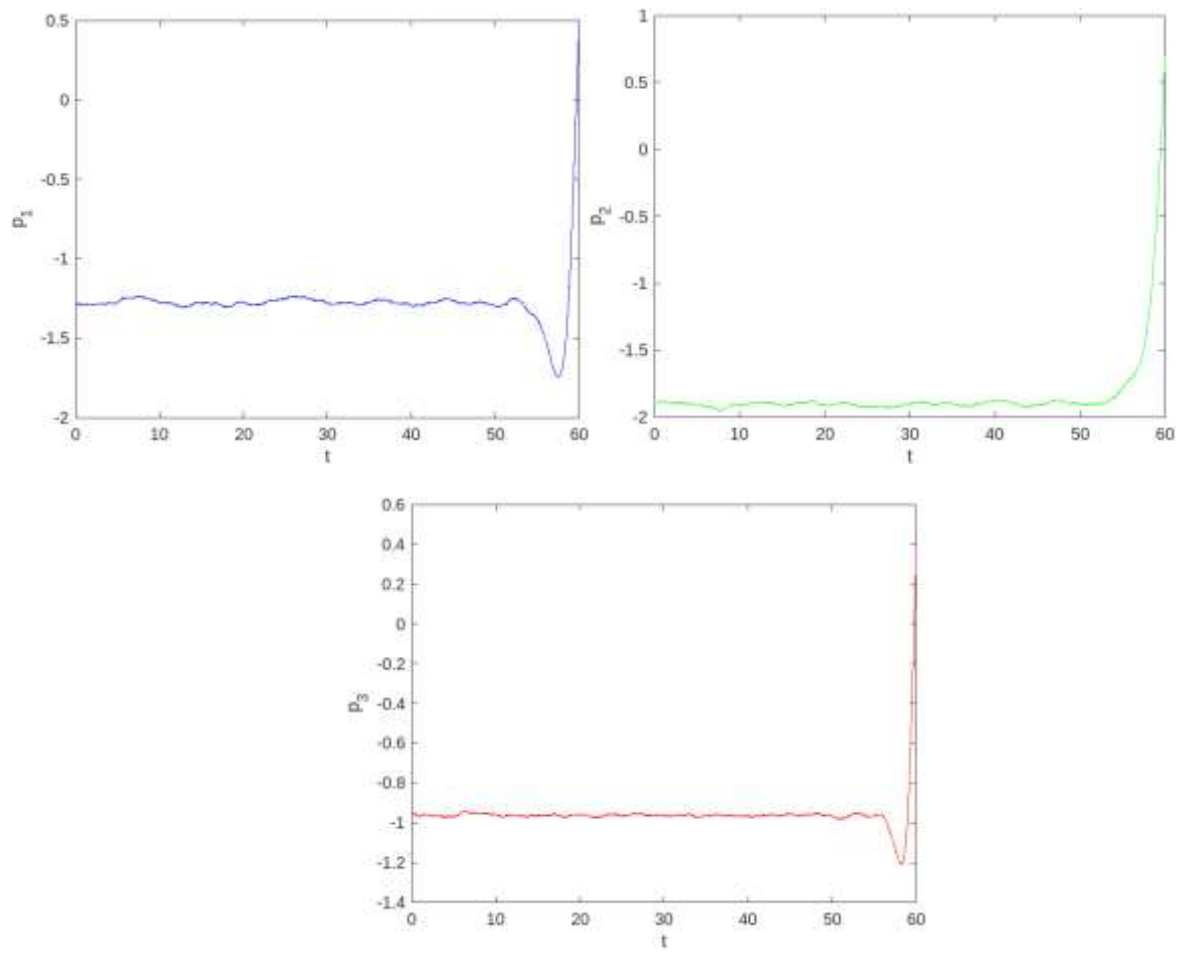


Figura 3. Estados adjuntos $p_1(t), p_2(t), p_3(t)$.

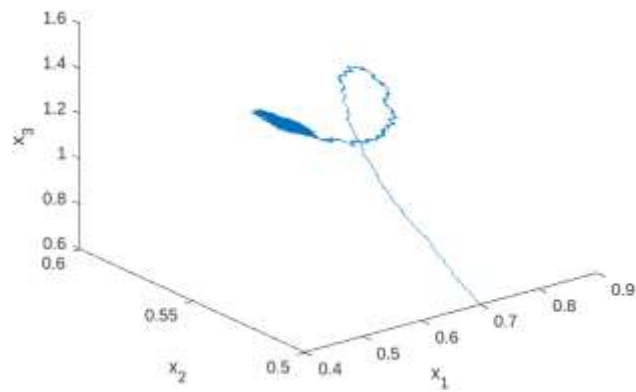


Figura 4. Espacio fase de los estados $(x_1(t), x_2(t), x_3(t))$

4. Análisis de los resultados.

En la Figura 1 se presentan las trayectorias límite de los estados $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$, obtenidas utilizando el esquema de Runge-Kutta. Puede apreciarse la permanencia de las trayectorias dentro de una vecindad de la solución del problema estacionario. En la Figura 2 se presenta la trayectoria límite de los controles óptimos $u(t), u_2(t), u_3(t)$, en la Figura 3 aparecen las trayectorias de los estados adjuntos $p_1(t), p_2(t), p_3(t)$ y en la figura 4, la trayectoria en el espacio fase. Puede apreciarse en ésta la acción de los controles durante la trayectoria en la que el sistema está bajo perturbaciones aleatorias y en donde la trayectoria se converge a un ciclo límite. A través de las simulaciones numéricas, se encontró que el programa realizado en Matlab es muy sensible a los cambios de los valores de los parámetros. Sin embargo, con los controles óptimos encontrados los valores de los parámetros, se preservó la estabilidad de las soluciones, a pesar de las perturbaciones aplicadas.

5.Conclusión.

En este trabajo se analizó la estabilidad de las soluciones de un modelo controlado estocástico de Lotka-Volterra. Se estableció un problema de control óptimo y se demostró, utilizando técnicas de Control Geométrico, que el sistema presenta un tipo de estabilidad llamado propiedad de Turnpike. Se logró determinar los controles óptimos, en términos de los parámetros, las variables de estado y las variables adjuntas. Se presentó una simulación, considerando las soluciones numéricas mediante el esquema Runge-Kutta, mostrando así, que el ejemplo estudiado presenta la estabilidad Turnpike.

6.Referencias.

- [1] Lotka, A.J. (1956). Elements of mathematical Biology. Una bridge republication of: Elements of physical biology. New Tork, Dover.
- [2] Volterra, V. (1931). Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie. Paris: Gauthier-Villars.
- [3] Chapman, D.G. (1967). Stochastics model in animal population ecology. Proc. Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 4, 147–162. Berkeley University of California Press.
- [4] Zhao, J., Shao, Y. (2021). Dynamical analysis of a stochastic three-species predator-prey system with distributed delays. Adv. Dif. Eq. 2021, 344.
- [5] Gu, X.D., Zhu, W.Q. (2016). Stochastic optimal control of predator-prey ecosystem by using stochastic maximum principle. Nonlinear Dyn. 85, 1177- 1184.
- [6] Le Gall, J-F. (2013). Brownian Motion, Martingales, and Stochastic Calculus. Springer-Verlag.
- [7] Romero-Meléndez, C., Castillo-Fernández, D., González-Santos, L. (2021). Asymptotic

stability in a controlled stochastic Lotka-Volterra model with Lvy noise. Complexity Journal, in press.

- [8] Trélat, E., E. Zuazua. (2015). The turnpike property in finite dimensional nonlinear optimal control, J. Diff. Equ. 258, pp. 81-114.
- [9] Romero-Meléndez, C., Castillo Fernández, D., Gonzáles Santos, L. (2021). On the Boundedness of the Numerical Solutions' Mean Value in a Stochastic Lotka-Volterra Model and the Turnpike Property. Complexity.

Perspectiva de un potencial energético. Gradiente térmico en otoño en Bahía de La Paz, México y la zona oceánica adyacente

¹Obeso-Nieblas, M., ¹Galvan-Magaña F.

¹Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas - Instituto Politécnico Nacional

mniebla@ipn.mx

1. Resumen

La Conferencia COP28 de 2023 reconoce que las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero deben reducirse 43% para 2030, con relación a 2019, para limitar el calentamiento global a 1.5 °C. Lo que hace urgente la búsqueda de energía renovable. El Gradiente Térmico, proporciona energía renovable utilizando la diferencia de temperatura oceánica para producir electricidad, durante todo el año. Estas instalaciones se basan en la diferencia de temperatura, de al menos 20 grados centígrados, entre la superficie y el fondo oceánico. Estas condiciones se producen en las áreas tropicales de México. Se analiza la diferencia de temperatura en septiembre de 2018, donde se localizó al menos una zona dentro de la Bahía de La Paz, con 20 °C entre la superficie y el fondo, en la Cuenca Alfonso (estación E14). En la zona oceánica adyacente (estaciones E06 y E07) la diferencia de temperatura fue mayores a 20 °C.

2. Introducción

Considerando que la población mundial en julio de 2024 es de aproximadamente 8 124 649 035 habitantes y según el crecimiento registrado se espera que para julio del año 2050 se haya incrementado a 9 735 033 990 habitantes, con un consumo actual de energía de aproximadamente 85×10^{12} kWh. Para el 2050 este consumo se estima se triplicará, por tanto, la economía y la población mundial requerirán cada vez de mayores cantidades de energía para su crecimiento con el fin de mantener y mejorar los niveles de vida actuales ^[1 y 2].

En todos los países hay fuentes de energías renovables, cuyo potencial todavía no se ha aprovechado completamente. La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) calcula que el 90% de la electricidad mundial puede y debe tener su origen en las energías renovables para el año 2050 ^[3].

Recordemos que el Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante. Fue adoptado por 196 Partes en la COP21 en París, el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo es limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2 °C, preferiblemente a 1.5 °C, en comparación con los niveles preindustriales. Para alcanzar este objetivo de temperatura a largo plazo, los países se proponen alcanzar el máximo de las emisiones de gases de efecto invernadero lo antes posible para lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo ^[4].

Los océanos cubren alrededor del 71% de la superficie terrestre esta agua retiene aproximadamente el 15% del total de la energía solar como energía térmica. La tecnología que permite generar energía a través de las diferencias de temperatura en el océano se llama Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC por sus siglas en inglés). Este tipo de energía se concentra en la parte superficial del agua de mar y va disminuyendo exponencialmente al incrementar la profundidad, a medida que se llega al fondo marino ^[2,5].

De acuerdo con el programa de colaboración tecnológica para los Sistemas de Energía Oceánica, (OES por sus siglas en inglés), las energías renovables del océano son un reto y oportunidad para la humanidad. En las próximas décadas el aprovechamiento de estos recursos debe convertirse en un elemento importante dentro de la matriz energética de las naciones que cuentan con acceso al mar ^[6].

En 2013, la Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) definieron las bases para la creación de los Centros Mexicanos para la Innovación en Energías Renovables (CEMIE), los cuales pretenden promover sinergias para el desarrollo y adaptación de planes de acción para superar las barreras y retos tecnológicos relacionados con el uso de fuentes de energía renovables. En 2017 inició operaciones el Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE-Océano) coordinado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, que conjunta el esfuerzo de 42 instituciones nacionales ^[7].

La visión del CEMIE-Océano es la de convertirse en un núcleo multidisciplinario proveedor de investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación, dirigidos a la extracción de las diversas formas de energía del océano, su conversión y distribución, por medio de la unión de las capacidades de la academia, la industria y el gobierno federal. Su misión se centra en generar productos innovadores, técnicas y tecnologías que exploten la diversidad de recursos energéticos oceánicos disponibles para suministrar energía sustentable, efectiva y rentable, para satisfacer parcialmente la demanda energética de la República Mexicana ^[8].

La energía marina (marea, olas, corrientes, gradiente salino y gradiente térmico) podría convertirse en un aspecto esencial para que el mundo pueda garantizar que un importante porcentaje de la generación eléctrica se realice con recursos renovables en el futuro inmediato ^[2].

El Gradiente Térmico, es una tecnología de energía renovable que utiliza la diferencia de temperatura en los océanos para producir electricidad limpia y confiable, día y noche, durante todo el año. El calor de la superficie cálida del océano y el frío del océano profundo impulsan un tipo de ciclo de Rankine (abierto, cerrado o híbrido), que produce electricidad, esto tiene el potencial de convertirse en una de las principales fuentes de energía renovable ^[2].

El ciclo abierto también conocido como ciclo de Claude, usa el agua de mar como fluido de trabajo, el agua superficial del mar que de acuerdo con su latitud es cálida se dirige hacia una cámara que tiene una presión menor a la atmosférica, donde una fracción del agua se evapora, la mezcla se conduce a un separador que separará el vapor seco del agua líquida para enviar sólo el vapor a una turbina de baja presión con el fin de generar electricidad ^[2].

Al ciclo cerrado también se le conoce como ciclo de Anderson, cuenta con un fluido de trabajo diferente al agua de mar, el agua de mar superficial cálida es usada para ceder su calor al fluido de trabajo a través de intercambiadores de calor. Los fluidos de trabajo que se utilizan en este ciclo son fluidos orgánicos como el propano, butano, el freón, el amoníaco y diversos refrigerantes como R134a, R123, R152a, R32, entre otros ^[2].

El ciclo híbrido ofrece los beneficios de los ciclos abiertos y cerrados. El agua tibia de mar es evaporada en una cámara de vacío, el vapor obtenido en esta cámara es pasada a un intercambiador de calor, donde se circulará el fluido de trabajo, generalmente será un fluido orgánico ^[2].

Este sistema puede utilizarse para cubrir las necesidades energéticas en las regiones tropicales del planeta. El calor oceánico podría, además utilizarse para producir agua desalada, sistemas de aire acondicionado, desarrollar granjas agrícolas y piscifactorías, extraer minerales y sobre todo luchar contra el cambio climático. La conversión de energía térmica del océano es constante y permanente, a diferencia de otras energías renovables, como la eólica o la fotovoltaica ^[9].

Estas instalaciones se basan en la diferencia de temperatura, de al menos 20 grados centígrados, entre la superficie y el fondo de los océanos ^[10, 11 y 12]. México posee aguas oceánicas con características óptimas para desarrollar este tipo de energía en el Golfo de California, Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe (Fig. 1).

Si comparamos a OTEC con el resto de las demás fuentes renovables, su investigación y proyectos todavía se encuentran en una fase preliminar, pero su potencial es muy alto. Posee un factor de capacidad muy elevado (entre el 80 y 97%) permitiendo una producción eléctrica constante, disminuyendo las intermitencias que se observan en zonas donde la electricidad se genera por otro tipo de energías. El impulso de este tipo de tecnología podría dar solución a la creciente demanda energética del país, así como desencadenar un posible desarrollo tecnológico, social y económico en las poblaciones costeras ^[13].

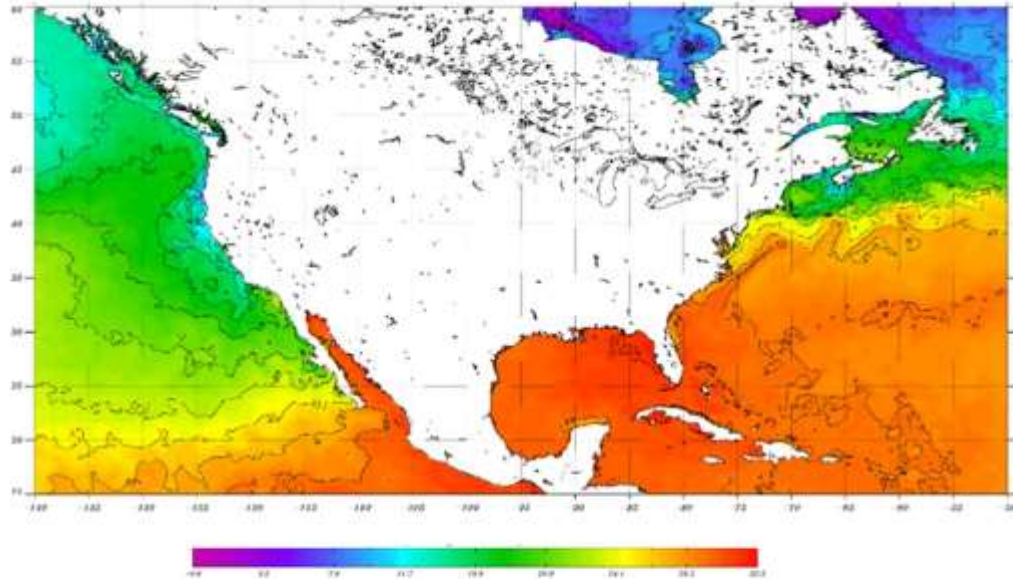


Fig. 1. Temperatura superficial del mar en °C, el 26 de julio de 2024 en las costas mexicanas. Tomado de la NOAA. <https://www.ospo.noaa.gov/data/sst/contour/namerica.c.gif>

3. Condiciones experimentales

La Bahía de La Paz, se localiza desde los 24.1° hasta los 24.8° de latitud norte y de los 110.2° a 110.8° de longitud oeste. Es la bahía más grande en la costa oriental de Baja California. Sus aguas son profundas en gran parte de su extensión, donde se localiza la Cuenca Alfonso con 450 m de profundidad, con un umbral suave en la Boca Norte frente a la Isla San José. Tiene una extensión aproximada de 80 km de largo y su parte más ancha es de 35 km (Fig. 2) ^[14].

En la Bahía de La Paz, durante los meses de noviembre a mayo, los vientos soplan por la mañana del noroeste y después del crepúsculo cambian a vientos del sur; durante el resto del año los vientos del sureste y del suroeste son los dominantes ^[15]. Las calmas son frecuentes durante primavera y verano ^[14]. Existen vientos que pueden alcanzar los 10 m/s ^[16].

El campo de viento se determina principalmente por el desplazamiento atmosférico del centro de alta presión del Pacífico y centro de baja presión del Desierto de Sonora ^[17]. En el Golfo de California, la intensidad del campo de viento es máxima durante el invierno (8-12 m/s) cuando predominan los vientos del noroeste. En los veranos, los vientos del sureste (5 m/s) predominan ^[18].

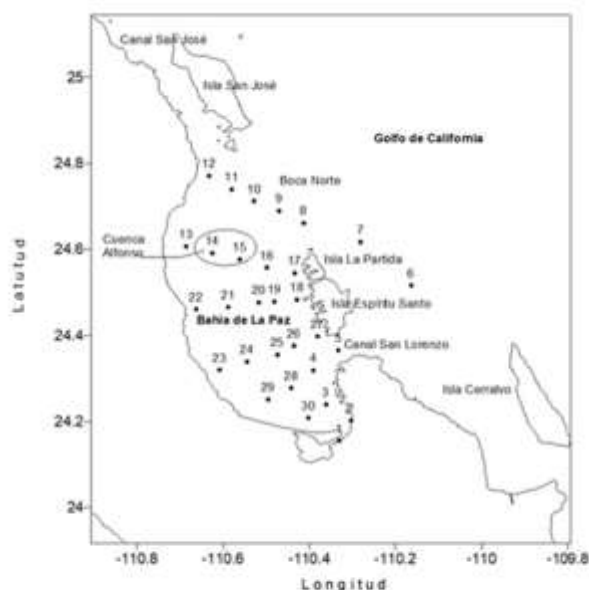


Fig. 2. Estaciones muestreadas el 26 y 27 de septiembre de 2018 en Bahía de La Paz y la zona oceánica adyacente

Con el objetivo de localizar áreas con diferencia vertical de temperatura con al menos 20 °C, en Bahía de La Paz y la zona oceánica adyacente, se analizó el registro vertical de la variable temperatura hasta la profundidad máxima obtenida con un CTD marca SeaBird modelo 19 plus, en el muestreo de campo realizado el 26 y 27 de septiembre (verano) de 2018 según la red de estaciones que se muestra en la (Fig. 2). Se calculó la diferencia de temperatura con relación a la temperatura superficial y el gradiente térmico en la columna de agua para cada estación muestreada.

4. Resultados y discusión

Se aprecia un perfil de temperatura relativamente uniforme con un valor superficial promedio de 29.861 °C con una capa de mezcla mínima de 13 m, una bien definida e importante y muy escarpada termoclina que se localizó entre la capa de mezcla y los 200 m (Fig. 3), después de esta profundidad se aprecia una disminución gradual de la temperatura hasta los 10.028 °C a los 361 m en la bahía y en la zona oceánica adyacente 7.679 °C a los 537 m de profundidad en la estación E06 y 7.633 °C en la estación E07 a los 511 m (Fig. 4).

En la Fig. 5, se muestra la diferencia de temperatura con respecto a la superficie en todas las estaciones muestreadas el 26 y 27 de septiembre de 2018 en Bahía de La Paz y la zona oceánica adyacente. Se puede apreciar un incremento de esta diferencia con la profundidad con la mayor variación entre la superficie y los 200 metros, con un valor de 16.988 °C en la estación E06 y 17.269 °C en la estación E07 en la zona oceánica adyacente, mientras que, en la región más profunda de la bahía en la Cuenca Alfonso, en la estación E14 se registraron 16.903 °C. Después de los 200 m de profundidad la diferencia es menos pronunciada. En este muestreo se aprecia una capa de mezcla máxima en algunas estaciones de 23 m, con una estructura muy uniforme en toda la columna.

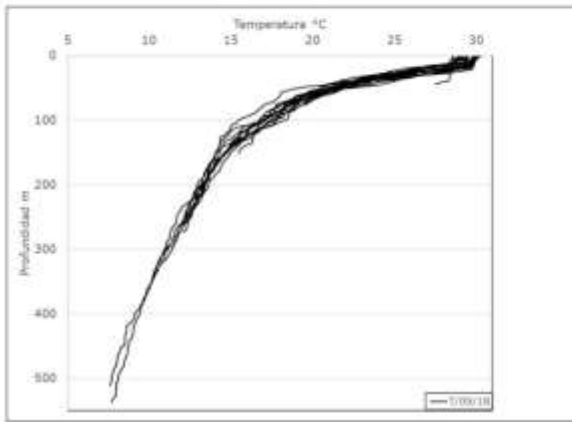


Fig. 3. Temperatura en cada estación muestreada el 26 y 27 de septiembre de 2018 en Bahía de La Paz y la zona oceánica adyacente

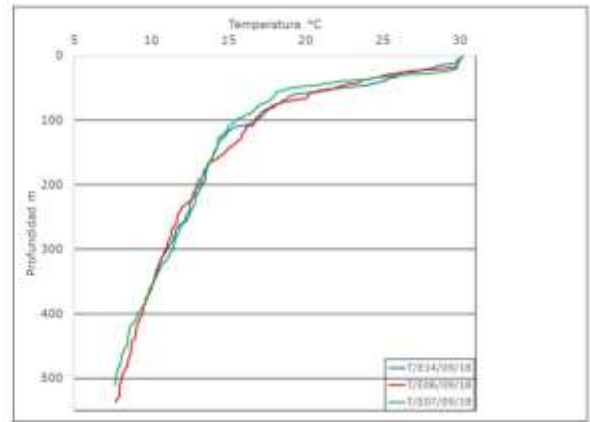


Fig. 4. Temperatura en las estaciones E14, E06 y E07 muestreadas el 26 y 27 de septiembre de 2018 en Bahía de La Paz y la zona oceánica adyacente

En la Cuenca Alfonso (estación E14), se aprecia una diferencia de temperatura de 20.137 °C a los 361 m de profundidad, mientras que en la zona oceánica adyacente en la estación E06 la diferencia fue de 22.453 °C a los 537 m y en la estación E07 esta diferencia fue de 22.563 °C a los 511 m, como se muestra en la (Fig. 6).

El gradiente térmico con respecto a la superficie para todas las estaciones en la Bahía de La Paz y la zona oceánica adyacente los días 26 y 27 de septiembre de 2018, muestra un incremento muy importante en la capa subsuperficial, calculándose el máximo a los 51 m de profundidad en la zona oceánica adyacente en la estación E07 frente a la parte norte de la Isla la Partida (Figs. 2 y 7). Después se registró una disminución hasta la máxima profundidad muestreada.

La (Fig. 8) muestra el gradiente térmico con respecto a la superficie para las estaciones (E14 en Cuenca Alfonso) y las estaciones E06 y E07 en la zona oceánica adyacente, donde se aprecia el mayor gradiente de temperatura en la estación E07 con 0.223 °Cm⁻¹ a los 51 m de profundidad, seguido de la estación E14 con 0.181 °Cm⁻¹ a los 60 m y finalmente la estación E06 con 0.171 °Cm⁻¹ a los 37 m.

5. Conclusiones

La estructura del perfil de temperatura tiene una forma muy compacta, lo que muestra una variación espacial y temporal mínima en la Bahía de La Paz y la zona oceánica adyacente, durante este muestreo de septiembre de 2018.

La termoclina estuvo muy escarpada y se encontró próxima a la superficie durante septiembre de 2018. Con la máxima temperatura superficial, así como también la máxima diferencia superficial,

el máximo gradiente térmico superficial y el máximo gradiente térmico a los 51 m de profundidad, en la estación E07 frente a la parte noreste de la isla La Partida en la zona oceánica adyacente.

La diferencia de temperatura calculada en el muestreo de verano de 2018 (septiembre), nos muestra que es factible localizar al menos una zona dentro de la Bahía de La Paz, donde se obtuvo un valor de 20.137 °C entre la superficie y la profundidad muestreada. Esta zona se ubica en la estación E14 en la Cuenca Alfonso, la región más profunda de la bahía.

En la zona oceánica adyacente muestreada (estación E06) se registró una diferencia de temperatura de 22.453 °C entre la superficie y la profundidad de 537 m, mientras que en la estación E07 a los 511 m de profundidad la diferencia de temperatura con la superficie fue de 22.563 °C, en septiembre de 2018.

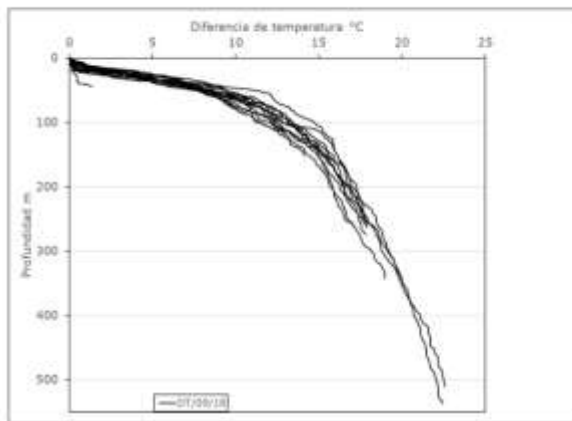


Fig. 5. Diferencia de temperatura con respecto a la temperatura superficial el 26 y 27 de septiembre de 2018 en Bahía de La Paz y la zona oceánica adyacente

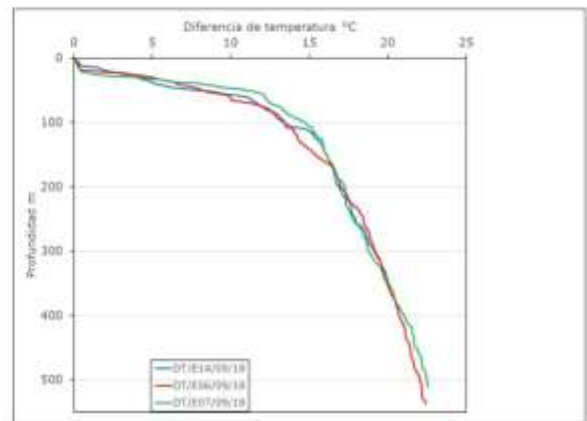


Fig. 6. Diferencia de temperatura en las estaciones E14, E06 y E07, con respecto a la temperatura superficial el 26 y 27 de septiembre de 2018 en Bahía de La Paz y la zona oceánica adyacente

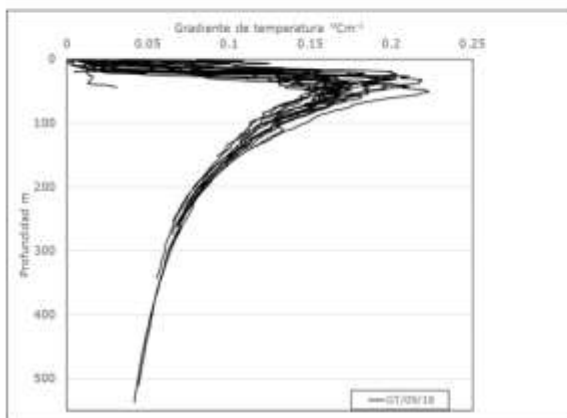


Fig. 7. Gradiente de temperatura con respecto a la temperatura superficial para todas las estaciones muestreadas el 26 y 27 de septiembre de 2018

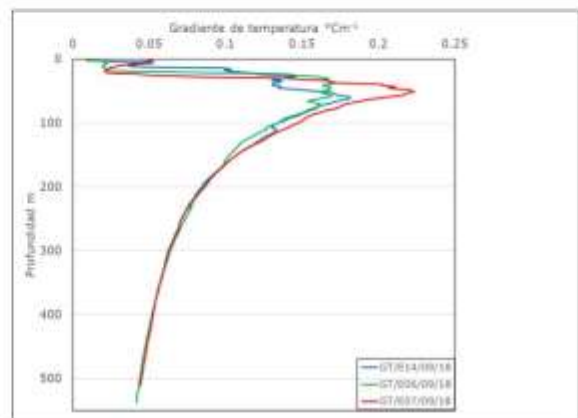


Fig. 8. Gradiente de temperatura con respecto a la temperatura superficial para las estaciones E14, E06 y E07 muestreadas el 26 y 27 de septiembre de 2018

6. Bibliografía

- 1.- Población Mundial, https://www.worldometers.info/es/poblacion-mundial/#google_vignette (2024)
- 2.- Bernal Francisco M., Estudio Técnico y Económico de una Planta OTEC y sus Usos Secundarios en México. Tesis que para optar por el Grado de: Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Energía – procesos y uso eficiente de energía, pp 88 (2016)
- 3.- Naciones Unidas, Energías renovables: energías para un futuro más seguro. <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy> (2022)
- 4.- United Nations. Climate Change, El Acuerdo de París. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris> (2024)
- 5.- García-Huante A., M. A. Alatorre-Mendieta, M. Merino-Ibarra y R. Silva-Casarín, Determinación teórica de la emisión de CO² de una planta OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) en la zona de Puerto Ángel, Oaxaca, México, 11-29. En: Cervantes Rendón E. y Montano Armendáriz G. (Eds) Medio ambiente y sociedad. La aplicación de tecnologías para resolver problemas socioambientales. El Colegio de Chihuahua. Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 139p. ISBN: 978-607-8214-45-7 (2017)
- 6.- Ocean Energy Systems, <https://www.ocean-energy-systems.org/> (2024)
- 7.- Secretaría de Energía, <https://www.gob.mx/sener/acciones-y-programas/programa-sectorial-de-energia-2013-2018> (2013)
- 8.- Posada G., R. Silva, A. Delgado, E. Baldwin, C. Enríquez, I. Mariño, F. Ocampo, y M. A. Alatorre, XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina (2018)

- 9.- Berger L. R. y J. A. Berger, Countermeasures to microbiofouling in simulated ocean thermal energy conversion heat exchanges with surface and deep water in Hawaii. Solar Energy Update: Final Issue, SFU-86-12, 31 pp (1986)
- 10.- Avery W. y C. Wu, Renewable energy from the ocean. A guide to OTEC. Oxford University Press, New York, 446 pp (1994)
- 11.- Vega L. A., Ocean Thermal Energy Conversion Economics. Offshore Infrastructure Asso (2007)
- 12.- Kim H. J., D. H. Jung, S. Y. Hong y H. S. Lee, Offshore structure of OTEC. Journal of the Korea Society for Power System Engineering, 17 (3) (2013)
- 13.- García Huante A. and E. Garduño Rui, Energía por Gradiente Térmico: Posible detonante para el desarrollo de México. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 61, 30-34 pp (2022)
- 14.- Obeso-Nieblas M., Variabilidad espacio-temporal de las condiciones oceanográficas de la Bahía de La Paz, BCS, México. Tesis de Doctorado, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN, La Paz, 337 pp (2003)
- 15.- Obeso-Nieblas M. & A. R. Jiménez-Illescas, Propagación de la constituyente M^2 de la marea en La Bahía de La Paz, Baja California Sur, México, mediante un modelo bidimensional hidrodinámico numérico. Investigaciones Marinas CICIMAR 4: 241-256 (1989)
- 16.- Jiménez-Illescas A. R., M. Obeso-Nieblas & D. A. Salas de León, Oceanografía física de la Bahía de La Paz, BCS. En: Urbán RJ & M Ramírez (eds). La Bahía de La Paz, Investigaciones y conservación, pp. 31-41. Universidad Autónoma de Baja California Sur, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Scripps Institute Oceanographic, La Paz (1997)
- 17.- Roden G. I., Thermohaline structure and baroclinic Flow across the Gulf of California entrance and in the Revilla Gigedo Islands region. Journal of Physical Oceanography 22: 177-183 (1972)
- 18.- Douglas M. W., R. A. Maddox, K. Howard & S. Reyes, The Mexican monsoon. Journal of Climate 6: 1665-1677 (1993)

Anillos generalizados de matrices con coeficientes en un campo.

Sáez Macegoza J de J, Vilchis Montalvo I F

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Avenida San Claudio y 18 sur, Colonia San Manuel, Edificio FM1-101B, Ciudad Universitaria. Puebla, Puebla, C.P. 72570.

jsiesussaez@gmail.com

1. Resumen

En este trabajo se presenta una construcción generalizada de los anillos de matrices a partir de dos conjuntos no vacíos. Se generalizan para espacios de dimensión arbitraria los conceptos de bases ordenadas, representación en coordenadas y representación matricial de transformaciones

lineales para establecer finalmente una relación entre los anillos de matrices generalizados y los anillos de endomorfismos en espacios vectoriales de dimensión arbitraria. Es importante mencionar que para obtener estos resultados es fundamental asumir el Axioma de Elección.

2. Introducción

Es conocido que si tenemos un campo F y un número natural n , el conjunto de las matrices con coeficientes en un campo, denotado por $\mathcal{M}_n(F)$ tiene estructura de anillo con unidad, considerando las operaciones de suma y producto conocidas.

En este trabajo, primero se construye un espacio vectorial de matrices a partir de un campo dado F y el producto cartesiano de dos conjuntos no vacíos I y J elegidos de manera arbitraria, espacio que se denota por $\mathcal{M}_{I \times J}(F)$. Una vez que se tiene construido este espacio de matrices, se demuestra que si I' y J' son conjuntos no vacíos de la misma cardinalidad de I y J , respectivamente, entonces los espacios $\mathcal{M}_{I \times J}(F)$ y $\mathcal{M}_{I' \times J'}(F)$ son isomorfos, lo que implica que no hay diferencia significativa entre los espacios de matrices sobre los conjuntos. Asumiendo el Axioma de Elección, se sabe que a cada conjunto se le puede asignar un cardinal, por lo que se eligen cardinales κ y λ y el espacio $\mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F)$ representa a todos los espacios de matrices sobre conjuntos de sendas cardinalidades, los cuáles son isomorfos. Una vez hecho esto, considerando un cardinal κ y el espacio de matrices $\mathcal{M}_\kappa(F) = \mathcal{M}_{\kappa \times \kappa}(F)$, donde se tiene una suma, adicionalmente se define un producto en este conjunto, donde se demuestra que, con la suma y el producto definidos, se dota a $\mathcal{M}_\kappa(F)$ de estructura de anillo con unidad. Finalmente, dado un campo F y un cardinal κ y un espacio vectorial V sobre F de dimensión κ , definiendo adecuadamente la representación matricial de una transformación lineal $T: V \rightarrow V$, los anillos $\text{End}(V)$ y $\mathcal{M}_\kappa(F)$ son isomorfos. El objetivo de este trabajo es extender las propiedades conocidas para matrices finitas a matrices de dimensiones arbitrarias y relacionarlas con las transformaciones lineales definidas entre espacios vectoriales de dimensión arbitraria.

3. Condiciones experimentales

Si F es un campo y X es un conjunto no vacío, se sabe que el conjunto

$$F^X = \{f \in \mathcal{P}(X \times F) \mid f \text{ es función}\} \quad (1)$$

tiene estructura de espacio vectorial sobre el campo F , con las operaciones $(f + g)(x) = f(x) + g(x)$ y $(cf)(x) = cf(x)$, para cada $f, g \in F^X, c \in F$ y $x \in X$. Ahora bien, para $f \in F^X$, se define el soporte de f como el conjunto

$$\text{sop}(f) = \{x \in X \mid f(x) \neq 0\}.$$

Definiendo el subconjunto de F^X , dado por

$$F^{(X)} = \{f \in F^X \mid |sop(f)| < \infty\} \quad (2)$$

se establece que $F^{(X)}$ es un subespacio de F^X y consecuentemente es un espacio vectorial. Teniendo estos elementos, si consideramos dos conjuntos no vacíos, a saber, I y J , se tiene que $F^{I \times J}$ es un espacio vectorial sobre F , por lo que la suma y producto por escalar están definidas como $(A + B)(i, j) = A(i, j) + B(i, j)$ y $(cA)(i, j) = cA(i, j)$, para cada $i \in I$ y $j \in J$, de modo que estaríamos tentados a definir el espacio de las matrices $I \times J$ como el espacio $F^{I \times J}$. Sin embargo, si nosotros intentamos definir un producto de matrices análogo al definido para las matrices finitas, es decir, consideramos conjuntos arbitrarios I, J y K no vacíos, tomamos $A \in F^{I \times J}$ y $B \in F^{J \times K}$, proponemos el producto de A con B como $AB \in F^{I \times K}$, donde

$$(AB)(i, k) = \sum_{j \in J} A(i, j)B(j, k) \quad (3)$$

para cada $i \in I$ y $k \in K$. Sin embargo, si J es un conjunto infinito, $i \in I$ y $k \in K$ son tales que $A(i, j) \neq 0$ y $B(j, k) \neq 0$ para todo $j \in J$, la suma de (3) tendría una cantidad infinita de sumandos diferentes de cero, lo cual no tiene sentido, lo que nos indica que es necesario ajustar nuestra definición. Observemos que si $A \in F^{I \times J}$, para cada $i \in I$, podemos definir la función $A(i, \cdot): J \rightarrow F$, dada por $A(i, \cdot)(j) = A(i, j)$ para cada $j \in J$. Análogamente, para cada $j \in J$, podemos definir la función $A(\cdot, j): I \rightarrow F$, definida por $A(\cdot, j)(i) = A(i, j)$. Una vez que tengamos definido nuestro espacio de matrices arbitrarias, para $i \in I$ y $j \in J$, a las funciones $A(i, \cdot)$ y $A(\cdot, j)$ les llamaremos la i -ésima fila de A y la j -ésima columna de A , respectivamente. Para continuar con la construcción de nuestro espacio de matrices, consideramos el siguiente subconjunto de $F^{I \times J}$:

$$\mathcal{M}_{I \times J}(F) = \{A \in F^{I \times J} \mid |sop(A(\cdot, j))| < \infty, \text{ para cada } j \in J\}. \quad (4)$$

Observemos en primera instancia que $\mathcal{M}_{I \times J}(F) \neq \emptyset$, pues $\bar{0}: I \times J \rightarrow F$, dada por $\bar{0}(i, j) = 0$ para cada $i \in I$ y $j \in J$ pertenece a $\mathcal{M}_{I \times J}(F)$. Además, se tiene que $\mathcal{M}_{I \times J}(F)$ es un subespacio de $F^{I \times J}$, pues si $A, B \in \mathcal{M}_{I \times J}(F)$ y $c \in F$, se tiene que para cada $j \in J$, $A(\cdot, j), B(\cdot, j) \in F^{(I)}$ y se sabe que $F^{(I)}$ es un subespacio de F^I , por lo que $A(\cdot, j) + cB(\cdot, j) \in F^{(I)}$, de donde se sigue que $A + cB \in \mathcal{M}_{I \times J}(F)$. De esta manera, $\mathcal{M}_{I \times J}(F)$ es un espacio vectorial sobre el campo F , al cual le llamamos *el espacio de las matrices $I \times J$ y coeficientes en F* . Definiendo así nuestro conjunto de matrices $I \times J$, el producto propuesto en (3) está bien definido. Si $A \in \mathcal{M}_{I \times J}(F)$ y $B \in \mathcal{M}_{J \times K}(F)$, para mostrar que el producto definido en (3) está bien definido, debemos mostrar que $AB \in \mathcal{M}_{I \times K}(F)$. En efecto, si $k \in K$, como $sop(B(\cdot, k)) = \{j_1, \dots, j_m\}$, para algún $m \in \mathbb{N}$. Así, la suma de (3) se reduce a

$$(AB)(i, k) = \sum_{s=1}^m A(i, j_s)B(j_s, k) \quad (5)$$

pues $B(j, k) = 0$ para todo $j \in J \setminus \{j_1, \dots, j_m\}$ y por tanto $A(i, j)B(j, k) = 0$ para cada $j \in J \setminus \{j_1, \dots, j_m\}$. Ahora bien, si $i \in sop((AB)(\cdot, k))$, entonces $(AB)(i, k) \neq 0$, de (5), se tiene que existe $t \in \{1, \dots, m\}$ tal que $A(i, j_t)B(j_t, k) \neq 0$, así que $A(i, j_t) \neq 0$, por lo que $i \in sop((A(\cdot, j_t)))$. En resumen, se ha mostrado que

$$sop((AB)(\cdot, k)) \subseteq \bigcup_{s=1}^m sop((A(\cdot, j_s))) \quad (6)$$

pero $\bigcup_{s=1}^m \text{sop}((A(, j_s))$ es un conjunto finito, por ser la unión finita de conjuntos finitos, por lo tanto, $\text{sop}((AB)(, k))$ es un conjunto finito, lo cual implica que $AB \in \mathcal{M}_{I \times K}(F)$, mostrando así que el producto que proponemos está bien definido. Ahora, si I' y J' son conjuntos tales que $|I| = |I'|$ y $|J| = |J'|$, por lo que existen biyecciones $\sigma: I \rightarrow I'$ y $\eta: J \rightarrow J'$ con inversas $\sigma^{-1}: I' \rightarrow I$ y $\eta^{-1}: J' \rightarrow J$. Sin mucho trabajo, se puede ver que la función $\sigma \times \eta: I \times J \rightarrow I' \times J'$, definida por $(\sigma \times \eta)(i, j) = (\sigma(i), \eta(j))$ para cada $i \in I$ y $j \in J$, es una biyección con inversa $\sigma^{-1} \times \eta^{-1}: I' \times J' \rightarrow I \times J$, definida como $(\sigma^{-1} \times \eta^{-1})(i', j') = (\sigma^{-1}(i'), \eta^{-1}(j'))$ para cada $i' \in I'$ y $j' \in J'$. Luego, se tiene que la función $\Gamma: \mathcal{M}_{I \times J}(F) \rightarrow \mathcal{M}_{I' \times J'}(F)$, definida por $\Gamma(A) = A \circ (\sigma^{-1} \times \eta^{-1})$ es un isomorfismo de espacios vectoriales, con inversa $\Lambda: \mathcal{M}_{I' \times J'}(F) \rightarrow \mathcal{M}_{I \times J}(F)$, definida como $\Lambda(B) = B \circ (\sigma \times \eta)$. En consecuencia,

$$\mathcal{M}_{I \times J}(F) \cong \mathcal{M}_{I' \times J'}(F) \quad (7)$$

como espacios vectoriales. En resumen, se tiene que el espacio de matrices construido es independiente de los conjuntos que se elijan de cierta cardinalidad, pues cualesquiera dos espacios de matrices que se construyan sobre conjuntos de la misma cardinalidad, son isomorfos entre sí. Ahora bien, si asumimos el Axioma de Elección, como se ha hecho para desarrollar este trabajo, se tiene que a cada conjunto se le puede asignar un único cardinal, usando este hecho se tiene que si κ y λ son cardinales, para cualesquiera conjuntos I y J , tales que $|I| = \kappa$ y $|J| = \lambda$, entonces por (7), $\mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F) \cong \mathcal{M}_{I \times J}(F)$, de modo que por simplicidad, se elegirán cardinales, pues al tomar un cardinal κ , estaríamos eligiendo un representante de todos los conjuntos de ese “tamaño”, además de que estos conjuntos tienen la propiedad de ser bien ordenados, de modo que si κ, λ y τ son cardinales, recordando su definición, para $A \in \mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F)$ y $B \in \mathcal{M}_{\lambda \times \tau}(F)$, podemos reescribir el producto de (3) como

$$(AB)(i, k) = \sum_{j < \lambda} A(i, j)B(j, k) \quad (8)$$

para cada $i < \kappa$ y $k < \tau$. Si dado un campo F , consideramos las clases

$$\mathcal{M}(F) = \{\mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F) \mid \kappa, \lambda \in \text{Card}\} \quad (9)$$

y

$$\text{Fin}(\mathcal{M}(F)) = \{\mathcal{M}_{m \times n}(F) \mid m, n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}\} \quad (10)$$

se tiene que $\text{Fin}(\mathcal{M}(F)) \subseteq \mathcal{M}(F)$ y la contención claramente es propia, pues $\mathcal{M}_{\aleph_0 \times \aleph_0}(F) \in \mathcal{M}(F) \setminus \text{Fin}(\mathcal{M}(F))$, de modo que la clase de matrices que proponemos es una extensión de la clase de las matrices finitas conocidas.

Se puede demostrar que si κ, λ, τ y α son cardinales, $d \in F$, $A, B \in \mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F)$, $C, D \in \mathcal{M}_{\lambda \times \tau}(F)$ y $E \in \mathcal{M}_{\tau \times \alpha}(F)$, se tienen las siguientes propiedades:

- 1) $(A + B)C = AC + BC$ (Distributividad por la izquierda).
- 2) $A(C + D) = AC + AD$ (Distributividad por la derecha).
- 3) $A(CE) = (AC)E$ (Asociatividad).
- 4) $(dA)C = A(dC) = d(AC)$ (Asociatividad de escalares).

Las cuales se demuestran de manera similar a las propiedades de matrices finitas conocidas.

Con respecto al producto que hemos propuesto, podemos ver que no es una operación en el conjunto $\mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F)$, en realidad, el producto que se propone se podría ver como una operación

$$\odot: \mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F) \times \mathcal{M}_{\lambda \times \tau}(F) \rightarrow \mathcal{M}_{\kappa \times \tau}(F) \quad (11)$$

definida como

$$A \odot B = AB \quad (12)$$

para $A \in \mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F)$ y $B \in \mathcal{M}_{\lambda \times \tau}(F)$, por lo que en un principio no le podemos dar estructura algebraica a $\mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F)$ con respecto al producto propuesto. Sin embargo, si nosotros consideramos un cardinal κ , sabemos que el espacio $\mathcal{M}_{\kappa}(F) = \mathcal{M}_{\kappa \times \kappa}(F)$ está definido por la construcción presentada; si consideramos el producto $\odot: \mathcal{M}_{\kappa}(F) \times \mathcal{M}_{\kappa}(F) \rightarrow \mathcal{M}_{\kappa}(F)$ definido como en (12), por las propiedades 1), 2) y 3) citadas anteriormente, se tiene que la cuarteta $(\mathcal{M}_{\kappa}(F), +, \bar{0}, \odot)$ es un anillo, pues $(\mathcal{M}_{\kappa}(F), +, \bar{0})$ es un grupo abeliano y $(\mathcal{M}_{\kappa}(F), \odot)$ es un semigrupo. Más aún, si nosotros consideramos $\Delta_{\kappa}: \kappa \times \kappa \rightarrow F$, definida por

$$\Delta_{\kappa}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{si } i = j \\ 0, & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (13)$$

para $i, j < \kappa$, es claro que $\Delta_{\kappa} \in \mathcal{M}_{\kappa}(F)$ y para cada $A \in \mathcal{M}_{\kappa}(F)$, se tiene que $\Delta_{\kappa}A = A = A\Delta_{\kappa}$, en consecuencia, la quinteta $(\mathcal{M}_{\kappa}(F), +, \bar{0}, \odot, \Delta_{\kappa})$ es un anillo conmutativo con uno.

Ahora, para relacionar los espacios y anillos de matrices que se han construido con los espacios de dimensión arbitraria, necesitamos generalizar los conceptos de bases ordenadas, representación de un vector en coordenadas y representación matricial de transformaciones lineales entre estos espacios.

3.1 Generalización de bases ordenadas, representación en coordenadas y representaciones matriciales.

Recordemos que, asumiendo el Axioma de Elección, todo espacio vectorial tiene base y todas las bases de un espacio vectorial, tienen la misma cardinalidad.

Si V es un espacio vectorial sobre un campo F de dimensión un cardinal κ , B es una base de V y $\sigma: \kappa \rightarrow B$ es una biyección, diremos que $\bar{B} = (B, \kappa, \sigma)$ es una base ordenada de V y dado que $B = (\sigma(i))_{i < \kappa}$ con $\sigma(i) \neq \sigma(j)$ cuando $i \neq j$, si denotamos $\sigma(i) = x_i \in B$, podemos denotar $B = (x_i)_{i < \kappa}$ asumiendo que $x_i \neq x_j$ cuando $i \neq j$, omitiendo la escritura de la biyección. Por ejemplo, si consideramos el espacio de los polinomios con coeficientes reales, denotado por $\mathbb{R}[x]$, se tiene que $B = (x^n)_{n < \omega}$, donde $\omega = |\mathbb{N}| = \aleph_0$, es una base ordenada para el espacio $\mathbb{R}[x]$.

Para generalizar el concepto de representación en coordenadas, es necesario recordar que si X es un conjunto no vacío, $F^{(X)}$ definido como en (2), es un espacio vectorial. Además, sin mucho trabajo se puede ver que $B = (\delta_x)_{x \in X}$ es una base ordenada de $F^{(X)}$, donde para cada $x \in X$, $\delta_x: X \rightarrow F$ es una función definida como

$$\delta_x(y) = \begin{cases} 1, & \text{si } y = x \\ 0, & \text{si } y \neq x \end{cases} \quad (14).$$

Si definimos $F^\emptyset = \{0_F\}$, tenemos definido $F^{(X)}$ para cualquier conjunto X ; dado que a cualquier conjunto de le puede asignar un cardinal, tenemos definido el espacio $F^{(\kappa)}$ para cualquier cardinal κ y $C_\kappa = (\delta_i)_{i < \kappa}$ es una base ordenada para $F^{(\kappa)}$. Para efectos de este trabajo, a la base ordenada C_κ se le llamará la base canónica de $F^{(\kappa)}$.

Ahora bien, si tenemos un espacio vectorial sobre F de dimensión κ y una base ordenada $B = (x_i)_{i < \kappa}$ de V , tenemos una única transformación lineal $\Phi_B: V \rightarrow F^{(\kappa)}$, tal que $\Phi_B(x_i) = \delta_i$ para cada $i < \kappa$ (recordemos que para definir una transformación lineal basta definirla en la base y además tal transformación lineal es única). La transformación lineal Φ_B es de hecho un isomorfismo entre V y $F^{(\kappa)}$. Para $v \in V$, a $\Phi_B(v)$ se le llamará la representación en coordenadas de v en la base B y se denotará por $[v]_B$.

Si κ y λ son cardinales, F es un campo y $T: F^{(\kappa)} \rightarrow F^{(\lambda)}$ es una transformación lineal, a la matriz $A \in \mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F)$ tal que $A(\cdot, j) = T(\delta_j)$ para cada $j < \lambda$, se le llamará la matriz de T .

Ahora, si consideramos V y W espacios vectoriales sobre F de dimensiones κ y λ , respectivamente, con bases ordenadas $B = (x_j)_{j < \kappa}$ y $C = (y_i)_{i < \lambda}$, respectivamente y $T: V \rightarrow W$ es una transformación lineal, la representación matricial de T en las bases de B y C , es la matriz de $\Phi_C \circ T \circ \Phi_B^{-1}$ del diagrama conmutativo de la Figura 1.

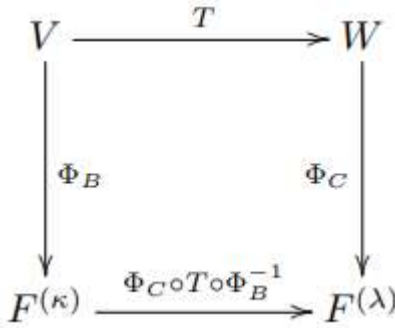


Figura 1: Diagrama conmutativo de las transformaciones lineales T y $\Phi_C \circ T \circ \Phi_B^{-1}$.

Esta representación matricial se denotará por $[T]_B^C$. Cuando $V = W$ y $B = C$, a $[T]_B^C$ se le llamará la representación matricial de T en la base B y se escribirá simplemente $[T]_B$. Haciendo las evaluaciones, se puede ver que para cada $i < \lambda$ y $j < \kappa$, $[T]_B^C(i, j) = [T(x_j)]_C(i)$. De hecho, la transformación lineal definida en la Figura 2 es un isomorfismo de espacios vectoriales cuya inversa es la definida en la Figura 3.

$$\begin{array}{ccc}
 \Psi_B^C : & Hom(V, W) & \rightarrow \mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F) \\
 & T & \mapsto [T]_B^C
 \end{array}$$

Figura 2: Isomorfismo entre los espacios $\text{Hom}(V, W)$ y $\mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F)$.

$$\begin{array}{ccc} \Gamma_B^C : \mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F) & \rightarrow & \text{Hom}(V, W) \\ A & \mapsto & T_A \end{array}$$

Figura 3: Inversa de Ψ_B^C .

donde $T_A: V \rightarrow W$ está dada por

$$T_A(x_j) = \sum_{i < \lambda} A(i, j) y_i \quad (15)$$

para cada $j < \kappa$. Con esto queda establecido que

$$\text{Hom}(V, W) \cong \mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F) \quad (16)$$

como espacios vectoriales, donde $\dim(V) = \kappa$ y $\dim(W) = \lambda$, con κ y λ cardinales arbitrarios.

3.2 Relación anillos generalizados de matrices-anillos de endomorfismos en un espacio vectorial de dimensión arbitraria.

Recordemos que si V es un espacio vectorial sobre un campo F , se tiene que $\text{End}(V) = \text{Hom}(V, V)$, el cuál es llamado el conjunto de endomorfismos en V , si definimos $\odot: \text{End}(V) \times \text{End}(V) \rightarrow \text{End}(V)$, dada por $\varphi \odot \varrho = \varphi \circ \varrho$ y consideramos la transformación lineal identidad $1_V: V \rightarrow V$, dada por $1_V(v) = v$ para cada $v \in V$, se tiene que la quinteta $(\text{End}(V), +, \bar{0}, \odot, 1_V)$ es un anillo con unidad, donde $+$ es la suma de usual de transformaciones lineales. Para relacionar el anillo $\text{End}(V)$ con el anillo $\mathcal{M}_\kappa(F)$, donde κ es un cardinal (finito o infinito) tal que $\dim(V) = \kappa$, necesitamos generalizar la representación matricial para la composición de transformaciones lineales en espacios de dimensión arbitraria.

Si κ es un cardinal, F es un campo y $f \in F^{(\kappa)}$, podemos ver a f como una matriz $\kappa \times 1$, donde $1 = \{\emptyset\}$, incluso se puede considerar a 1 como cualquier conjunto de un elemento, así se tendría que $f(j) = f(j, \emptyset)$ para cada $j < \kappa$. De esta manera, si $A \in \mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F)$, la multiplicación Af está definida y es una matriz $\lambda \times 1$ y por el mismo argumento podemos suponer que $Af \in F^{(\lambda)}$. Continuando con este desarrollo, si κ y λ son cardinales y $A \in \mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F)$, podemos definir una única transformación lineal $\mu_A: F^{(\kappa)} \rightarrow F^{(\lambda)}$ tal que $\mu_A(\delta_j) = A\delta_j$, para cada $j < \kappa$, considerando la base canónica de $F^{(\kappa)}$, a saber, C_κ . Usando la definición de la transformación lineal, se puede ver que $[\mu_A]_{C_\kappa}^{C_\lambda} = A$, donde C_κ y C_λ son las bases canónicas de $F^{(\kappa)}$ y $F^{(\lambda)}$, respectivamente.

Se tiene también que si F es un campo, κ y λ son cardinales arbitrarios y $T: F^{(\kappa)} \rightarrow F^{(\lambda)}$ es una transformación lineal, entonces $T = \mu_A$, donde $A = [T]_{C_\kappa}^{C_\lambda} \in \mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F)$. En resumen, todas las

transformaciones lineales de $F^{(\kappa)}$ y $F^{(\lambda)}$, son multiplicar por una matriz $\lambda \times \kappa$. Se muestra también que si $A \in \mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F)$, $B \in \mathcal{M}_{\tau \times \lambda}(F)$, entonces $\mu_B \circ \mu_A = \mu_{BA}$.

Ahora, si V y W son espacios vectoriales sobre F de dimensiones κ y λ , respectivamente, con bases ordenadas $B = (x_j)_{j < \kappa}$ y $C = (y_i)_{i < \lambda}$, respectivamente, se tiene que el diagrama de la Figura 4 es conmutativo, con lo que se relacionan las transformaciones lineales entre $F^{(\kappa)}$ y $F^{(\lambda)}$ y las transformaciones lineales entre V y W .

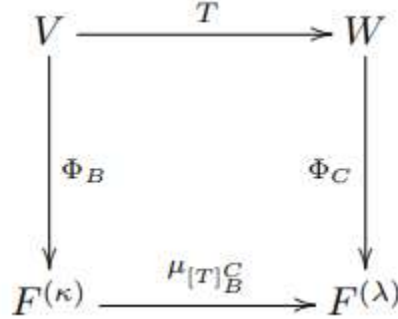


Figura 4: Relación entre transformaciones lineales de V en W y transformaciones lineales de $F^{(\kappa)}$ en $F^{(\lambda)}$.

Con los resultados anteriores, se establece que si κ , λ y τ son cardinales, V , W y Z son espacios vectoriales de dimensiones κ , λ y τ , respectivamente, con bases ordenadas $B = (x_j)_{j < \kappa}$, $C = (y_i)_{i < \lambda}$ y $D = (z_k)_{k < \tau}$, $T: V \rightarrow W$ y $S: W \rightarrow Z$ son transformaciones lineales, entonces

$$[S \circ T]_B^D = [S]_C^D [T]_B^C \quad (17).$$

En particular, si $T: V \rightarrow V$ y $S: V \rightarrow V$ son transformaciones lineales y B es una base ordenada de V , entonces

$$[S \circ T]_B = [S]_B [T]_B \quad (18).$$

Además, se cumple que

$$[1_V] = \Delta_\kappa. \quad (19)$$

Usando estos resultados se establece que $End(V) \cong \mathcal{M}_\kappa(F)$ como anillos.

Ahora, si $A \in \mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F)$ es una matriz invertible si existe $B \in \mathcal{M}_{\lambda \times \kappa}(F)$ tal que $BA = \Delta_\lambda$ y $AB = \Delta_\kappa$. Se muestra que si $A \in \mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F)$ es una matriz invertible, entonces $\kappa = \lambda$. Si definimos el conjunto de matrices invertibles como

$$GL(\kappa, F) = \{A \in \mathcal{M}_\kappa(F) \mid A \text{ es invertible}\} \quad (20)$$

Se tiene que $GL(\kappa, F) \neq \emptyset$, ya que $\Delta_\kappa \in GL(\kappa, F)$. Además, $GL(\kappa, F)$ es un grupo bajo la multiplicación de matrices y $GL(\kappa, F) \cong Aut(V)$ como grupos, si V es un espacio vectorial sobre F de dimensión κ .

4. Resultados y discusión

Los principales resultados obtenidos en este trabajo son los siguientes:

- Si V y W son espacios vectoriales sobre un campo F , de dimensiones λ y κ , respectivamente, entonces $\text{Hom}(V, W) \cong \mathcal{M}_{\kappa \times \lambda}(F)$ como espacios vectoriales, donde κ y λ son cardinales arbitrarios.
- Si κ es un cardinal infinito no numerable, el anillo $\mathcal{M}_{\kappa}(F)$ contiene a todos los anillos de matrices finitas y a las matrices numerales, y generan una cadena creciente $\{0\} \subseteq \mathcal{M}_1(F) \subseteq \mathcal{M}_2(F) \subseteq \dots \subseteq \mathcal{M}_n(F) \subseteq \mathcal{M}_{n+1}(F) \subseteq \dots \subseteq \mathcal{M}_{\mathbb{N}}(F) \subseteq \mathcal{M}_{\kappa}(F)$.
- Si V es un espacio vectorial de dimensión κ , entonces $\text{End}(V) \cong \mathcal{M}_{\kappa}(F)$ como anillos, donde $\text{End}(V) = \text{Hom}(V, V)$.
- Si V es un espacio vectorial de dimensión κ , entonces $\text{Aut}(V) \cong GL(\kappa, F)$ como grupos, donde $\text{Aut}(V) = \{\varphi \in \text{End}(V) \mid \varphi \text{ es isomorfismo}\}$ y $GL(\kappa, F) = \{A \in \mathcal{M}_{\kappa}(F) \mid A \text{ es invertible}\}$.

5. Conclusiones

Es posible generalizar la teoría que relaciona matrices y transformaciones lineales que se conoce para el caso finito-dimensional a dimensiones arbitrarias. Sin embargo, sería interesante estudiar si se pueden extender los conceptos de diagonalización, formas canónicas, etc.; así como estudiar que tan factible es representar transformaciones lineales como matrices en el caso de espacios infinito-dimensionales.

6. Bibliografía

1. Alejandro Bravo Mojica, Hugo Rincón Mejía, Cesar Rincón Orta. *Algebra superior*. Primera edición. México: Facultad de Ciencias, UNAM, 2006.
2. Hugo Alberto Rincón Mejía. *Algebra lineal*. Segunda edición. México: Facultad de ciencias, UNAM, 2006.
3. Fernando Hernández Hernández. *Teoría de conjuntos, una introducción*, Segunda edición. México: Sociedad matemática mexicana, 2003.
4. Jonathan S. Golan. *The linear algebra a beginning graduate student ought to know*, Second edition. USA: Springer, 2007.

Determinación de la temperatura de gelificación para la caracterización reológica en hidrogeles para impresión 3D

García - Romero E.L.¹, Barrientos - Cruz A.A.¹, Pérez - Salas K.Y.², Aguayo J.P.²

¹ Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Ciudad de México 04510, México.

² Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Ciudad de México 04510, México.

erika.garcia@icat.unam.mx
alexa.barrientos@icat.unam.mx
karen.perez@icat.unam.mx
pablo.aguayo@icat.unam.mx

1. Resumen

La temperatura de gelificación debe considerarse para el estudio de caracterización reológica de materiales utilizados en procesos de extrusión de materiales en manufactura aditiva, ya que indica de la presencia del esfuerzo de cedencia de los materiales.

Para determinar esta temperatura, se realizaron mediciones reológicas rotacionales (en las que se determina la viscosidad de forma directa) y oscilatorias de pequeña amplitud (SAOS por sus siglas en inglés). Las pruebas rotacionales permiten obtener la variación de la viscosidad con respecto a la temperatura y en las oscilatorias, son los módulos (elástico y viscoso) los que varían también en función de la temperatura. El objetivo del presente trabajo es evaluar cuál de las de las pruebas es más eficiente para determinar la temperatura de gelificación, pues es un parámetro que influye en forma determinante para la selección de la temperatura para impresión en un bioplotter 3D.

2. Introducción

En los últimos años, el estudio de la bioimpresión 3D ha generado un avance considerable con el objetivo de reproducir estructuras de órganos que emulen la funcionalidad de los tejidos^[1]. Para esto, se emplean impresoras conformadas por un depósito de presión y temperatura controlada y un mecanismo de dispensación^[2].

Los hidrogeles son materiales blandos que son constituidos por una red polimérica tridimensional reticulada ricas en agua, ya que puede retener hasta el 99.9%^[3]. Estos materiales son muy utilizados para la bioimpresión 3D debido a su capacidad de imitar el entorno natural de las células, así como facilitar la distribución celular homogénea^{[4][5]}.

Por otro lado, la reología es el estudio de la deformación y movimiento de la materia, es decir, es el estudio del comportamiento de los materiales que fluyen en función de la rapidez de corte o del tiempo. Por lo cual, las propiedades reológicas juegan un papel muy importante en el proceso y evaluación de bioimpresión^[6]. Sin embargo, existen un gran número de investigaciones que no consideran las propiedades reológicas en las elaboraciones de hidrogeles^[5], así como el desconocimiento de las propiedades reológicas y su influencia en el proceso de impresión^[4]. De acuerdo con Paxton et al.^[7] y Tian et al.^[1], las propiedades reológicas que pueden determinar una capacidad de impresión aceptable son principalmente el adelgazamiento al corte, esfuerzo de cedencia y la recuperación del material.

Particularmente, el esfuerzo de cedencia es el valor del esfuerzo en que los materiales empiezan a fluir, es decir, hay materiales que muestran poca o ninguna deformación hasta que alcancen este valor del esfuerzo, ya cuando es superado este valor, el material empieza a fluir^[8]. El esfuerzo de cedencia es un indicador para mejorar la fidelidad de la impresión, ya que su presencia puede evitar el colapso de la estructura 3D depositada e impide la sedimentación de las células en el depósito del precursor del hidrogel^[5].

Ahora bien, la temperatura de gelificación en que ocurre la transición de sol-gel se debe de conocer, ya que a partir de esta se puede determinar la temperatura de la impresión^[9]. Del mismo modo, la temperatura de gelificación en conjunto con el esfuerzo de cedencia permite determinar el intervalo de presión de operación del equipo, la cual debe ser suficiente para vencer el esfuerzo de cedencia y que el fluido comience a depositarse durante el proceso de impresión^[10].

Un método para determinar la temperatura de gelificación es mediante pruebas oscilatorias de pequeña amplitud, estas pruebas determinan los valores del módulo elástico G' y módulo viscoso G'' con respecto a la temperatura, cuya intersección entre las curvas de los módulos elásticos y viscoso ($G' = G''$), determinan la temperatura de gelificación^[11] como se puede ver en la Figura 1a. Es importante destacar que, en la cámara de inyección del bioplotter 3D, se debe cumplir la condición de que los valores del módulo elástico deben ser ligeramente mayores a los del módulo viscoso ($G' > G''$), ya que el material a analizar debe mostrar cierta firmeza y estabilidad. Durante la etapa de inyección, las deformaciones que experimenta el material son de gran magnitud, que el material se comporta como líquido, pero durante la etapa de deposición, al formar las estructuras, el material regresa a una etapa de muy baja deformación y de nuevo, G' debe ser mayor que G'' , aunque en esta etapa la diferencia entre estas dos cantidades debe ser significativa, pues eso asegura una buena retención de la forma.

Otro método para determinar la temperatura de gelificación es realizar mediciones rotacionales que consiste en variar la viscosidad con respecto a la temperatura^[10]. Como se puede observar en la Figura 1b, la curva de viscosidad tiene un cambio de pendiente y disminuye a medida que la temperatura incrementa, por lo que, tiene un punto de inflexión que corresponde a la temperatura de gelificación^[10].

En el presente trabajo, se estudiará a mayor detalle la determinación de la temperatura de gel en muestras de gelatina (Gelatin Difco), gelatina con alginato, que son hidrogeles considerados con biopolímeros y utilizados en la impresión 3D^[12], así como en una disolución de Gelatin methacryloyl

(GelMa), que un hidrogel utilizado por su excelente biocompatibilidad, biodegradabilidad y moldeabilidad^[13].

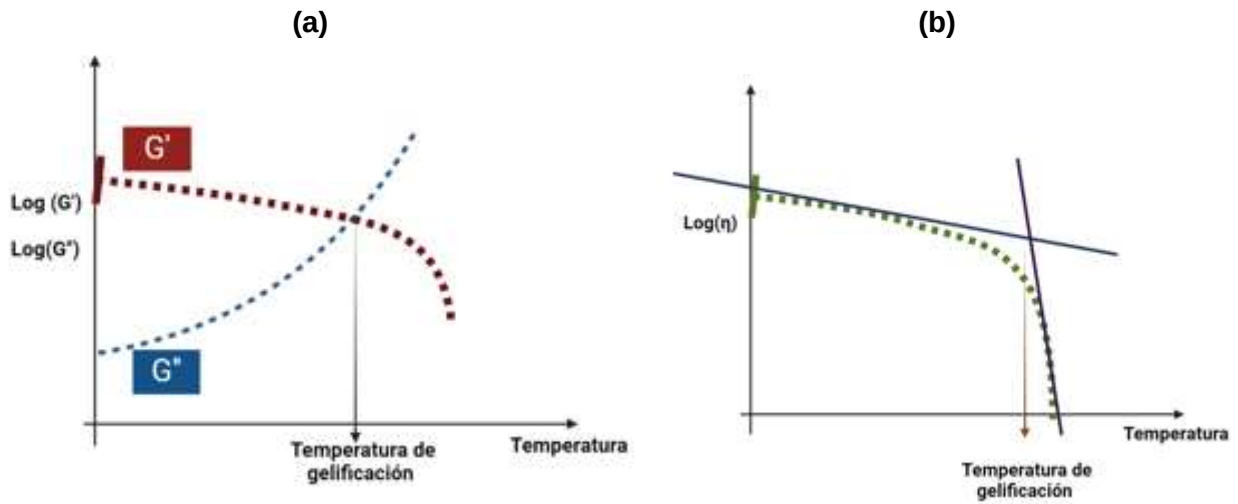


Figura 1. Determinación del punto de gel

3. Condiciones experimentales

Se desarrollaron pruebas oscilatorias y viscosidad en un reómetro Anton Paar MCR101 equipado con una configuración de placas paralelas de 25 mm con gap de 1 mm. También, se utilizó una trampa de disolvente para mantener la temperatura constante y evitar que el disolvente se evaporara como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Reómetro con la trampa.

Para realizar las pruebas reológicas, se utilizaron disoluciones de gelatina (Gelatin Difco) identificada como G, alginato señalado como A y combinaciones entre ambos reactivos nombrado como A-G. En la tabla 1, se muestran las cantidades y nomenclaturas utilizadas para las muestras empleadas.

Tabla 1. Proporciones utilizadas de gelatina y alginato

Muestra	Alginato (A) [g]	Gelatina (G) [g]
G	-	6%
(A-G)	4%	5%
(A-G)2	2%	5%
(A-G)3	5%	3%

También, se realizó una disolución de gelatin methacryloyl con agua al 10% m/m, señalado como GM, para las pruebas reológicas de oscilación y rotacionales.

4. Resultados y discusión

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos de las pruebas oscilatorias que corresponde a los datos de los módulos G' y G'' , así como las pruebas rotacionales correspondientes a los datos de viscosidad (η) con respecto a la temperatura de las muestras de gelatina (G), alginato-gelatina (A-G) y gelatin methacryloyl (GM).

Las mediciones presentadas a continuación se realizaron por duplicado en el reómetro.

4.1 Pruebas oscilatorias (G' , G'' vs temperatura).

La figura 3 muestra los resultados de la variación de los módulos G' y G'' con respecto la temperatura de las diferentes muestras. Es importante especificar que el eje de los módulos se encuentra en escala logarítmica, mientras que el eje de la temperatura en escala lineal.

La muestra de gelatina (G), que corresponde a los datos en color rojo, presenta valores de los módulos elásticos superiores a los módulos viscosos, por lo que se cumple la condición de ($G' > G''$) antes del punto de cruce entre las curvas de los módulos y se comporta como un gel. A su vez, se observa un descenso drástico de los módulos conforme aumenta la temperatura.

Las muestras de combinación de alginato y gelatina (A-G), datos en color azul, rosa y verde, presentan valores de módulos elásticos más grandes que los módulos viscosos antes del punto de cruce. Por lo que, las muestras A-G se comportan como un gel, ya que cumplen con la condición de ($G' > G''$). A diferencia de la muestra G, la variación de los módulos G' y G'' en las muestras A-G presentó una disminución gradual con respecto la temperatura. En el caso de la muestra (A-G)₂, datos en color azul, presentan una variación más pronunciada que en las demás muestra de A-G.

Las muestras de gelatin methacryloyl (GM), datos en color morado, cumplen con la condición de ($G' > G''$) antes de la intersección entre las curvas de los módulos elástico y viscoso. A comparación de las demás muestras, GM mostró una separación más grande entre los módulos.

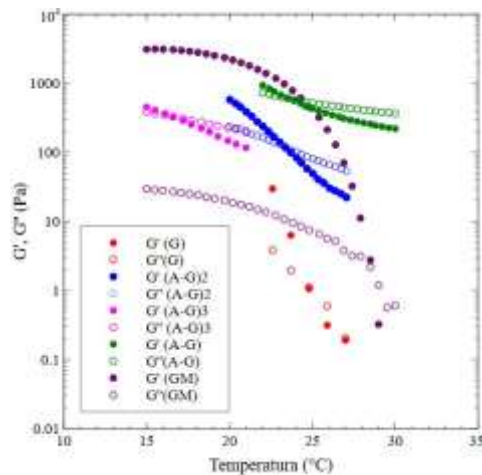


Figura 3. Resultados de la variación de G' y G'' con respecto la temperatura.

Ahora bien, se llevaron a cabo ajustes de funciones a las curvas de los módulos G' y G'' para encontrar la temperatura de gelificación con el fin de tener más exactitud en el punto de cruce. Se utilizó un software para determinar las funciones y parámetros que ajustan a los datos de los módulos elástico y viscoso. La figura 4 presenta un ejemplo del ajuste de funciones a los datos de módulos para la muestra G. Los puntos rojos y azules representan los datos experimentales, mientras que las líneas azules y rojas represente el ajuste a los datos experimentales.

Para obtener la temperatura de gelificación, se calculó la intersección entre las funciones ajustadas a cada módulo. Además, se puede verificar este cálculo a partir de la gráfica, ya que la temperatura buscada es donde se cruzan los módulos. En el caso de la muestra G, la temperatura de gelificación calculada es de 24.7°C, mientras al observar la gráfica se puede aproximar a una temperatura de 25°C.

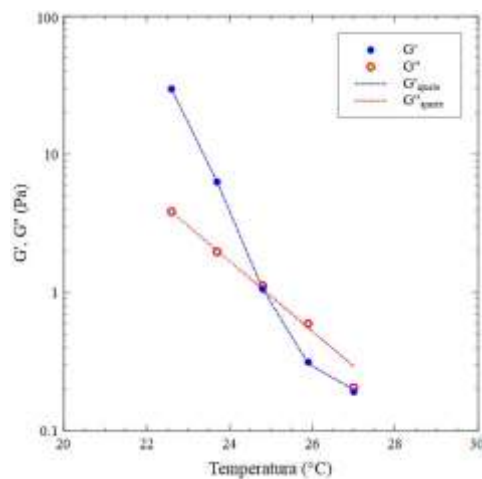


Figura 4. Determinación de la temperatura de gelificación a partir de mediciones oscilatorias

4.1 Pruebas rotacionales (η' vs temperatura).

La figura 5 presenta los resultados de las variaciones de viscosidad con respecto a la temperatura para las muestras de gelatina (G), alginato-gelatina para las muestras (A-G)3, (A-G)2 y GM.

La muestra de gelatina (G) presenta un descenso abrupto en la viscosidad con respecto la temperatura. Por otro lado, las muestras de alginato-gelatina (A-G) presenta un descenso de viscosidad gradual con respecto a la muestra G. La muestra de gelatin methacryloyl (GM) presenta un descenso de viscosidad más relajado comparado con las demás muestras.

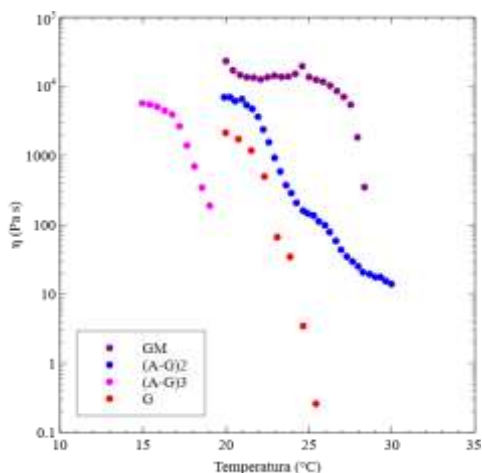


Figura 5. Resultados de la variación de viscosidad (η) con respecto la temperatura.

Por otra parte, se realizó un ajuste por medio de dos rectas tangentes a los datos de viscosidad con respecto a la temperatura como se puede ver en la figura 6. Es importante mencionar que, los datos se encuentran graficados en escala semi-logarítmica, donde el eje que corresponde a la temperatura es lineal y el eje de la viscosidad está en escala logarítmica.

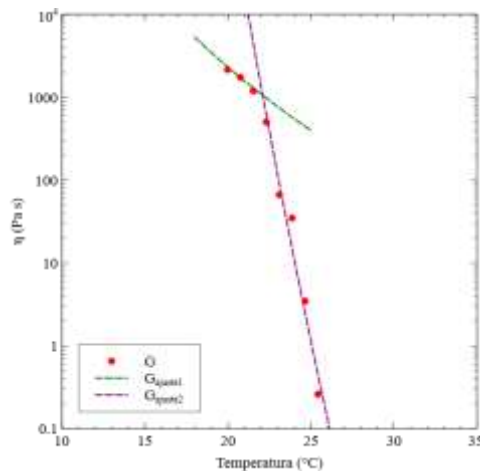


Figura 6. Determinación de la temperatura de gelificación a partir de mediciones rotacionales

Para realizar este método, se separaron los datos de cada muestra en dos partes, justo cuando se presenta un cambio drástico en la pendiente o en la variación de los datos. Posteriormente, se ajustó cada parte a una línea recta por medio de un modelo de potencia, ya que el eje de viscosidad es logarítmico. Para finalizar con el método, se calculó la intersección entre ambas partes a partir de las funciones ajustadas con el propósito de encontrar la temperatura de gelificación como se puede ver en la figura 4.

En caso de la muestra G, se identificó el cambio de pendiente por la temperatura 22°C y a partir de este punto se dividió la variación de los datos en dos partes, cada una se ajustó a un modelo potencial. Posteriormente, se calculó la intersección entre ambas funciones y determinar la temperatura de gelificación que en este ejemplo es de 21.6 °C.

4.1 Determinación de la temperatura de gelificación

Los resultados de las temperaturas de gelificación determinadas por las mediciones oscilatorias y rotacionales se presentan en la Tabla 2. Para la muestra (A-G), se determinó la temperatura de gelificación únicamente por mediciones oscilatorias.

Como se puede ver en la Tabla 2, las temperaturas de gelificación varían de acuerdo con las mediciones hechas, ya que varían de 3°C a 0.3°C, es decir, en algunos casos puede ser mayor, menor o aproximadamente similar la temperatura obtenida por ambas mediciones.

Tabla 2. Temperaturas de gelificación obtenidas en pruebas oscilatorias y rotacionales

Muestra	G' y G''	η	Diferencia
	Temperatura de gelificación (°C)	Temperatura de gelificación (°C)	
G	24.7	21.6	3.1
(A-G)3	16.7	17.0	0.3
(A-G)2	23.3	21.3	2.0
(A-G)	23.6	NA	NA
GM	28.3	27.4	0.9

Particularmente, las mediciones oscilatorias ajustadas a funciones, cuyos valores de coeficiente de correlación (R^2) fueron muy cercanos al 0.9. Por ello, se tiene confianza en las funciones obtenidas por medio del software para calcular o aproximar el valor de la intersección entre las curvas de los módulos elástico y viscoso (G' y G'').

Además, los datos experimentales de G' y G'' graficados en función de la temperatura, nos puede dar un indicio de cuál podría ser la temperatura de gelificación a partir del cruce entre los módulos. Al comparar las temperaturas obtenidas con la figura 3, los valores son muy similares, por lo cual el ajuste de las funciones fue el adecuado.

Por otro lado, en el caso de las mediciones rotaciones, los valores de los coeficientes de correlación (R^2) fueron muy dispersos, pues solo en algunos casos se obtuvieron valores mayores a 0.9.

Es decir, el valor de R^2 de una de las partes divididas oscilara alrededor de 0.9, mientras que el valor de R^2 de la otra parte puede aproximarse a 0.9 hasta 0.4. Estos coeficientes ayudan a valorar la calidad del ajuste de las funciones utilizadas, pero también dependen de cuantos datos se consideren, y en qué valores de viscosidad y temperatura se contemple el cambio drástico de la pendiente.

Al observar la figura 4, hay muestras como G y (A-G)3 que exhiben un evidente cambio de pendiente aproximadamente en las temperaturas de 24°C y 17°C, respectivamente, lo cual puede ser una forma de corroborar qué tan bien resulto el ajuste de las rectas. En cambio, la muestra GM si exhibe un cambio de pendiente, pero no es abrupto como en las demás muestras, por lo cual, es crucial saber determinar cuántos datos considerar en cada parte para ajustarlos a una recta.

Se puede determinar la existencia del esfuerzo de cedencia a partir de un barrido de amplitud, en las cuales se miden los módulos elásticos y viscoso en función de la deformación, y si la muestra en particular cumple la condición de $G' > G''$, entonces sí puede haber un esfuerzo de cedencia, el cual se determina con el cruce entre las curvas de los módulos. La dos últimas condiciones son muy similares a la forma en que se identificó a la temperatura de gelificación, por lo que, esta temperatura

es un indicativo de la presencia del esfuerzo de cedencia. Estos esfuerzos de cedencia son diferentes de cero, ya que las muestras se comportan como un sólido con una estructura definida. Es importante mencionar que, a mayor temperatura, el valor del esfuerzo de cedencia decrece, ya que cuando ocurre el cruce entre los módulos, es justo el momento en que el esfuerzo de cedencia es cero, y la muestra ya no presenta una estructura y se comporta como líquido.

En el caso de las pruebas rotacionales, la viscosidad es más alta cuando el material estudiado es un gel y se encuentra en condiciones cercanas al reposo, ya que tiene un comportamiento de semi-sólido, tiene una estructura definida y presenta un esfuerzo de cedencia diferente de cero. Tan pronto se le aplique una fuerza al gel, éste empieza a fluir, por lo que, la viscosidad empieza a disminuir, la estructura se destruye por la deformación impuesta y el esfuerzo de cedencia ya fue superado porque la muestra ya se encuentra en movimiento (flujo). Lo descrito anteriormente se ejemplifica con la figura 1b, ya que la variación de la viscosidad es grande al inicio que corresponde a condiciones cercanas a reposo (la muestra todavía tiene estructura), pero conforme va aumentando la temperatura, la viscosidad va descendiendo. Es justo en la transición de casi reposo a movimiento o cambio de pendiente cuando se puede identificar la temperatura de gel.

5. Conclusiones

En este trabajo se describen dos métodos para determinar de la temperatura de gelificación de muestras de gelatina (G), alginato-gelatina (A-G) y gelatin methacryloyl (GM), que son hidrogeles utilizados para la impresión 3D en el bioplotter. Asimismo, se estableció a la temperatura de gelificación como indicativo de la presencia del esfuerzo de cedencia en ambos métodos, ya que indica la transición de sólido a líquido en un material, así como la variación de su estructura.

El primer método corresponde a la medición de los módulos elástico G' y viscoso G'' con respecto a la temperatura. Se identifica a la temperatura de gelificación cuando se cruzan ambos módulos, pues en la temperatura en donde se cumple $G' = G''$, es la temperatura en donde el esfuerzo de cedencia es cero y por tanto, el material se comporta como un líquido.

Por otra parte, el segundo método corresponde a la medición de la viscosidad (η) con respecto a la temperatura. Se reconoce a la temperatura de gelificación cuando ocurre un cambio de pendiente drástico en la variación de los datos de viscosidad. En el momento en que ocurre el cambio de pendiente, también hay una transición de sólido a líquido.

Al comparar las temperaturas obtenidas entre ambos métodos, hubo una diferencia de 0.3°C a 3°C, es decir, ambos métodos de medición reportan temperaturas similares;

sin embargo, en algunos casos, la diferencia de 3°C puede ser importante. La diferencia más grande se observa para la muestra G.

Las mediciones oscilatorias ajustadas a funciones fue el método más factible para determinar la temperatura de gelificación, porque se puede calcular o aproximar el valor de la intersección entre las curvas de los módulos elástico y viscoso (G' y G'') a partir de las funciones ajustadas y constatarlo con el cruce entre los módulos en la gráfica.

Por otro lado, las mediciones en pruebas rotaciones puede ser un poco más complicadas debido a que se debe establecer el cambio de pendiente y cuantos puntos se toman en cuenta para realizar el ajuste a las rectas. Además, algunas muestras exhiben pocos datos posteriores al cambio de pendiente para realizar un buen ajuste.

6. Bibliografía

- [1] S. Tian, H. Zhao, y N. Lewinski, “Key parameters and applications of extrusion-based bioprinting”, *Bioprinting*, vol. 23, núm. March, p. e00156, 2021, doi: 10.1016/j.bprint.2021.e00156.
- [2] S. V. Murphy y A. Atala, “3D bioprinting of tissues and organs”, *Nat. Biotechnol.*, vol. 32, núm. 8, pp. 773–785, 2014, doi: 10.1038/nbt.2958.
- [3] R. Curvello, V. S. Raghuwanshi, y G. Garnier, “Engineering nanocellulose hydrogels for biomedical applications”, *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 267, pp. 47–61, 2019, doi: 10.1016/j.cis.2019.03.002.
- [4] V. H. M. Mouser, F. P. W. Melchels, J. Visser, W. J. A. Dhert, D. Gawlitta, y J. Malda, “Yield stress determines bioprintability of hydrogels based on gelatin-methacryloyl and gellan gum for cartilage bioprinting”, *Biofabrication*, vol. 8, núm. 3, 2016, doi: 10.1088/1758-5090/8/3/035003.
- [5] J. Malda *et al.*, “25th anniversary article: Engineering hydrogels for biofabrication”, *Adv. Mater.*, vol. 25, núm. 36, pp. 5011–5028, 2013, doi: 10.1002/adma.201302042.
- [6] M. Sarker y X. B. Chen, “Modeling the Flow Behavior and Flow Rate of Medium Viscosity Alginate for Scaffold Fabrication With a Three-Dimensional Bioplotter”, *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 139, núm. 8, pp. 1–14, 2017, doi: 10.1115/1.4036226.
- [7] N. Paxton, W. Smolan, T. Böck, F. Melchels, J. Groll, y T. Jungst, “Proposal to assess printability of bioinks for extrusion-based bioprinting and evaluation of rheological properties governing bioprintability”, *Biofabrication*, vol. 9, núm. 4, 2017, doi: 10.1088/1758-5090/aa8dd8.
- [8] M. Dinkgreve, J. Paredes, M. M. Denn, y D. Bonn, “On different ways of measuring ‘the’ yield stress”, *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 238, núm. November, pp. 233–241, 2016, doi: 10.1016/j.jnnfm.2016.11.001.

- [9] J. Wei *et al.*, “3D printing of an extremely tough hydrogel”, *RSC Adv.*, vol. 5, núm. 99, pp. 81324–81329, 2015, doi: 10.1039/c5ra16362e.
- [10] K. P. Pérez-Salas, “Estudio reológico aplicado a la procesabilidad de materiales por extrusión en manufactura aditiva”, Universidad Nacional Autónoma de México, 2023.
- [11] T. Mezger, *The Rheology Handbook*. 2020. doi: 10.1515/9783748603702.
- [12] Á. César *et al.*, “Uso y aplicación de la tecnología de impresión y bioimpresión 3D en medicina”, *Rev. la Fac. Med.*, vol. 61, núm. 6, pp. 43–51, 2018, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0026-17422018000600043&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [13] Y. Piao *et al.*, “Biomedical applications of gelatin methacryloyl hydrogels”, *Eng. Regen.*, vol. 2, núm. April, pp. 47–56, 2021, doi: 10.1016/j.engreg.2021.03.002.

7. Agradecimientos

Erika Leticia García Romero agradece el financiamiento otorgado por CONAHCyT por la beca de maestría con CVU 1318948. Alexa Angeles Barrientos Cruz agradece el financiamiento otorgado por CONAHCyT por la beca de maestría con CVU 1323290. La Dra. Karen-Pérez agradece el financiamiento otorgado por CONAHCyT por la beca posdoctoral con CVU 779993. El Dr. Juan Pablo Aguayo Vallejo agradece a la DGAPA por el financiamiento del proyecto PAPIIT IN112924.

Diseño mecánico de una mesa XY para optimización y automatización en cortes con plasma.

González-Uribe, I.¹, Damián-Noriega, Z.¹, Barragán-Santiago, I.¹, Hernández-Vidal, A.¹.

¹ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Departamento de Energía
Av. San Pablo No. 420 Col. Nueva el Rosario C.P. 02128, Alcaldía Azcapotzalco,
CDMX.

igu@azc.uam.mx, zedan@azc.uam.mx, isbasa@azc.uam.mx,
al2162004124@azc.uam.mx,

1. Resumen

El corte por plasma es un sistema que emplea un arco eléctrico que se encuentra estrangulado. El corte se produce a través de un chorro de gas ionizado a alta velocidad el cual se envía desde un orificio fundiendo el material [1]. Una de las problemáticas con estos equipos es la precisión en los cortes [2]. Dicha precisión depende de dos factores fundamentales: la actividad humana y las

herramientas implementadas [3]. Esto se visualiza cuando se utilizan máquinas herramientas manuales como es con una cortadora de plasma. Debido a esto, el objetivo de este trabajo es realizar el diseño mecánico de una mesa de corte XY para optimización y automatización de una cortadora de plasma manual. El diseño del equipo permitirá controlar los movimientos de la boquilla durante el proceso de corte, así como la disminución de errores y tiempos de maquinado.

Palabras clave: Corte por plasma, precisión, diseño mecánico, mesa de corte XY

2. Introducción

Las máquinas cortadoras de plasma (Figura 1) son equipos que funcionan mediante arco eléctrico el cual es dirigido a una boquilla con estrangulamiento que permite cortar materiales mediante chorro de gas ionizado a altas velocidades, permitiendo fundir el material en la zona de corte. Una de las problemáticas actuales dentro del campo de la industria manufacturera es el fuerte requerimiento de precisión dentro de sus actividades [2]. Dicha precisión es dependiente de dos factores fundamentales que son: la actividad humana y las herramientas implementadas, ambos siendo posibles causantes de errores que pueden afectar la calidad del producto final [3]. En comparativa, la presencia de estos errores es mayor en herramientas de uso manual que las automatizadas, sin mencionar que las primeras requieren un usuario cualificado y una mayor inversión de tiempo de trabajo, por lo que no es sorpresa la inclinación de la industria por instrumentos cada vez más automatizados.

La técnica por corte de plasma destaca sobre el resto debido su simplicidad y capacidad de cortar cualquier material, siendo implementada en diversos campos, no obstante, esta misma requiere un usuario capacitado y herramientas adicionales para llevar a cabo su trabajo correctamente, de ahí la necesidad de contar con un mecanismo que sea capaz de recibir órdenes y permita realizar cortes con un índice de error menor [4].



Figura 1. Máquina cortadora de plasma

Es por lo anterior expuesto, que este trabajo tiene el objetivo de realizar el diseño mecánico y la programación para convertir un cortador de plasma manual en un cortador CNC. Para esto como primera instancia, se requiere diseñar los elementos mecánicos que permitirán realizar el movimiento del equipo. De esta manera, se diseñan los ejes, tornillos guía, los cabezales para sujeción, la selección de rodamientos, así como los elementos de transmisión de potencia y dispositivos eléctricos necesarios para su funcionamiento.

Una vez terminado esto, se realizan las simulaciones necesarias para determinar la funcionalidad del equipo. Con lo cual, se garantiza que el equipo funciona adecuadamente en relación a las consideraciones de diseño. Esto permitirá realizar trabajos de una manera sencilla, evitando errores en los cortes y obteniendo exactitudes superiores en el proceso. Cabe señalar que, solamente se presenta el diseño y no la construcción y pruebas de funcionamiento ya que eso es para un trabajo futuro.

3. Condiciones experimentales

Las diversas consideraciones presentes en el diseño del equipo están divididas en los siguientes puntos. Los parámetros de diseño en base a cálculos para las guías lineales que permiten el movimiento en los ejes X y Y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño para las guías

Parámetros	Valores para eje X	Valores para eje Y
Número de Barras	2	4
Carga Máximo Total	50.9 N	57.58 N
Material Acero 4140	Normalizado	Normalizado
Resistencia a la Tensión (S_{ut})	1020 MPa	1020 MPa
Resistencia a la cedencia (S_y)	655 MPa	655 MPa
Dureza Brinell	302	302

Mediante los valores anteriores y el criterio de ED-Goodman se determinaron los diámetros característicos de cada una de las guías en las zonas posibles de falla, para esto se utiliza la ecuación 1 [5].

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left[\frac{1}{S_e} \left[4(k_f * M_a)^2 + 3(k_{fs} * T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(k_f * M_m)^2 + 3(k_{fs} * T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \right\} \quad (1)$$

Donde M_a es el momento alternante, M_m el momento medio, T_a el torque alternante y T_m el torque medio. Todos los valores fueron determinados de cálculos y de las gráficas de cortantes y momentos presentes en dos planos (XY y ZY) [5].

Para el cálculo del límite para la resistencia a la fatiga se utiliza la ecuación 2.

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \quad (2)$$

Donde k_a es el factor de modificación por la condición superficial, k_b es el factor de modificación por el tamaño, k_c es el factor de modificación por la carga, k_d es el factor actor de modificación por la temperatura, k_e es el factor de confiabilidad, k_f es el factor de modificación por efectos varios y S_e es el valor de límite de resistencia a la fatiga [6, 7].

Para determinar el parámetro de la resistencia mínima a la tensión S'_e se utiliza la ecuación 3.

$$S'_e \begin{cases} 0.5 Sut & Sut \leq 200 MPa \\ 100 kpsi & Sut > 200 kpsi \\ 700 MPa & Sut > 1400 MPa \end{cases} \quad (3)$$

Donde los términos de S_{ut} son la resistencia a la tensión mínima, [5]. Para determinar los radios de entalle y el diámetro mínimo de las guías se utiliza la ecuación 4 y 5.

$$\frac{D}{d} \quad (4)$$

$$\frac{r}{d} \quad (5)$$

Donde D es el diámetro máximo de la guía, d es el diámetro mínimo y r es el radio de entalle entre estos dos diámetros (Figura 2) y siendo la zona crítica o el lugar posible de falla [5]. Una vez realizado el diseño se determinó los cálculos para la potencia de los motores en relación a los pesos encontrados en el diseño de los elementos presentes como son, las guías, los tornillos, soportes entre otras piezas [5]. Las consideraciones para esto se muestran en la Tabla 2.

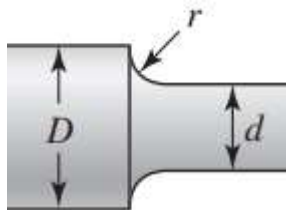


Figura 2. Esquema de la guía en zona crítica

Tabla 2. Parámetros para cálculo de potencia de los motores

Parámetros	Valores para X	Valores para eje Y
Peso Máximo	1.5 kg o 3.31 lb	6 kg o 13.23 lb
Carga radial	1.20 lb	4.81 lb
Velocidad	6000 mm/min o 19.68 pie/min	6000 mm/min o 19.68 pie/min

La potencia para cada motor se determinó con la ecuación 6 [5].

$$W_t = 33000 \frac{H}{V} \quad (6)$$

Donde W_t es la carga tangencial a mover, H la potencia del motor y V la velocidad. Posteriormente, se diseñaron los cojinetes bajo las siguientes características (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros para cálculo de cojinetes

Parámetros	Valores
Velocidad deseada en rpm	30.56 rpm
L_D (Vida deseada)	8000 horas
Carga radial deseable	0.58kN

El diseño de los cojinetes se realizó mediante la ecuación 7 [9].

$$C_{10}(L_R n_R 60)^{\frac{1}{a}} = F_D (L_D n_D 60)^{\frac{1}{a}}$$

Donde C_{10} es la clasificación de catálogo (Lbf o kN), L_R es la vida nominal en horas, n_R es la velocidad nominal (rpm), n_D es la velocidad deseada (rpm), L_D es la vida deseada (horas), F_D es la carga radial deseable (Lbf o kN).

4. Resultados y discusión

Después de haber realizado los cálculos pertinentes, lo primero que se propuso fue estandarizar los elementos de la mesa como son motores, valeros, soportes entre otros con el fin de poder ser remplazadas fácilmente y de esta misma manera sea más fácil de adquirir. Las memorias de cálculo para cada uno de los elementos se muestran a continuación (Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6).

Tabla 4. Resultados del diseño para los ejes

Guías lineales de los ejes X y Y			
Material	Acero 4140		
Guías lineales de los ejes X y Y 			
Magnitudes físicas	Siglas	Valor (eje X)	Valor (Eje Y)
Peso [N]	W	50.9	57.8
Momento máximo [Nm]	M _{max}	8.271	5.4
Cortante [N]	V	25.45	7.2
Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria [MPa]	S' _e	510	510
Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica	S _e	561.035	548.737
Momento flexionante alternante [Nm]	M _a	8.271	5.4
Torsión flexionante	T _m	0	0
Momento flexionante medio	M _m	0	0
Factor de seguridad	n	3.27	3.29
Diámetro máximo [mm]	D	11	10
Diámetro mínimo [mm]	d	9	8
Relación de diámetros [mm]	D/d	1.2	1.25
Largo [m]	L	1.5	

Tabla 5. Resultados del diseño para los motores



Motor en eje X y Y Motor a pasos NEMA 17

Magnitudes físicas	Unidad	Siglas	Valor
Peso máximo estimado	kgf	$P_{\max}$	1.5
Carga radial	lbf	Fr	1.2
Carga transmitida	lbf	W_t	1.2
Velocidad máxima de desplazamiento	mm/min; pie/min	V	6000 ; 19.68
Potencia	W	H	7.15×10^{-4}
Tamaño	cm ²	-	203
Peso	g	P	350
Diámetro del eje	mm	D_{eje}	5
Longitud del eje	mm	L_{eje}	25
Pasos por vuelta	pasos	-	1,8°
Corriente	Amperios	A	1.2
Tensión	Volts	V	4
Resistencia	Ohmios	Ohm	3.3
Torque	kg/cm	-	3.2
Inductancia	mili Hertz	mH	2.8

Tabla 6. Resultados del diseño para los cojinetes

Rodamiento rígido de bolas 619/9 			
Magnitudes físicas	Unidad	Siglas	Valor
Carga radial deseable	kN	FD	0.58
Clasificación de los cojinetes	kN	C10	0.138
Dimisiones	Unidad	Siglas	Valor
Diámetro del agujero	mm	d	9
Diámetro exterior	mm	D	20
Ancho	mm	B	6
Diámetro del resalte del aro interior	mm	d1	11.61
Diámetro del rebaje del resalte del aro exterior	mm	D2	17.44
Dimensión del chaflán del aro exterior	mm	r1,2	0.3

Una vez terminado el diseño, se procedió a realizar el ensamble del equipo mediante un software 3D dando como resultado la Figura 3.

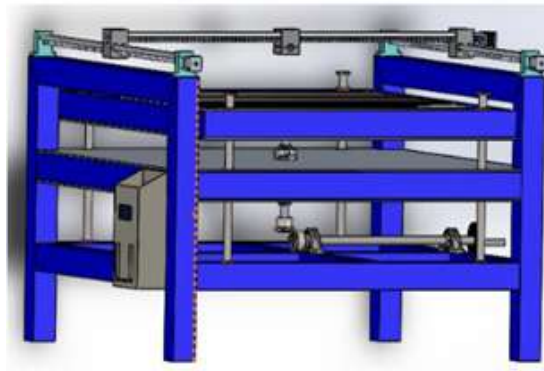


Figura 3. Ensamble del equipo

Los componentes principales del equipo se muestran en la Figura 4

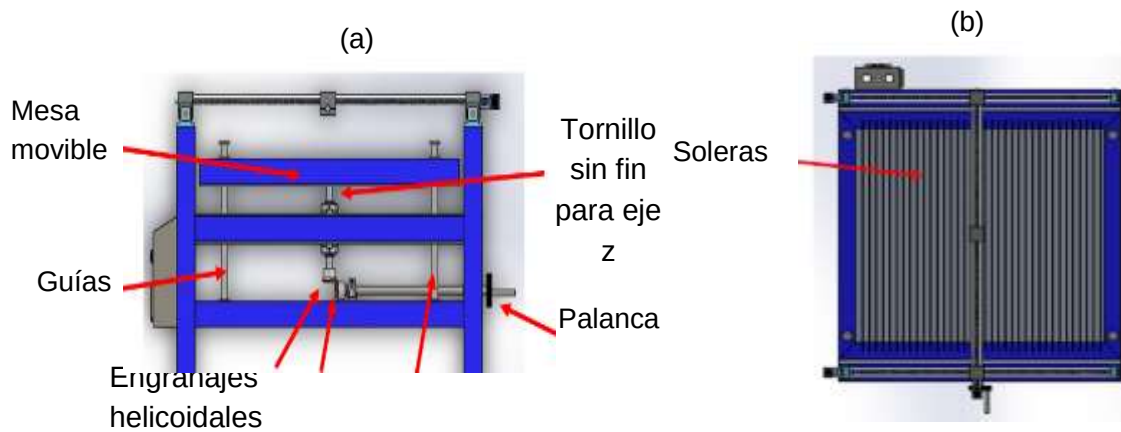


Figura 4. Partes importantes de la mesa XY: (a) Vista lateral y (b) Vista superior

La conexión del sistema de control se muestra en la siguiente figura (Figura 5).

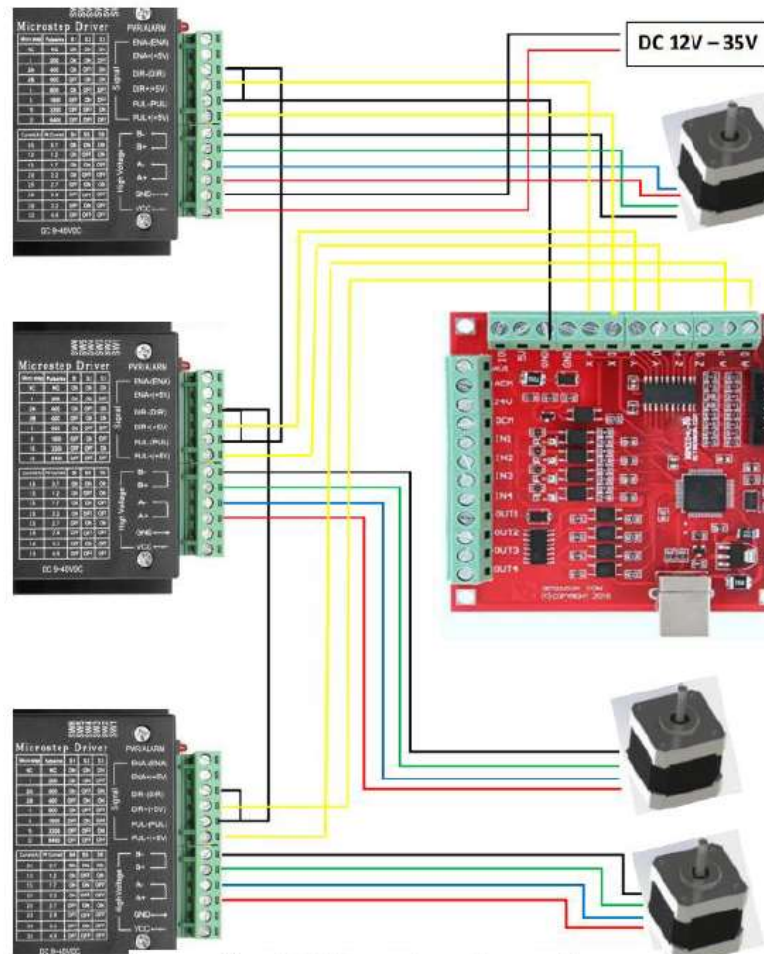


Figura 5. Conexión del sistema de control

Adicionalmente, se obtuvo mediante un software de diseño las trayectorias para la obtención de códigos G en diversas geometrías (Figura 6).

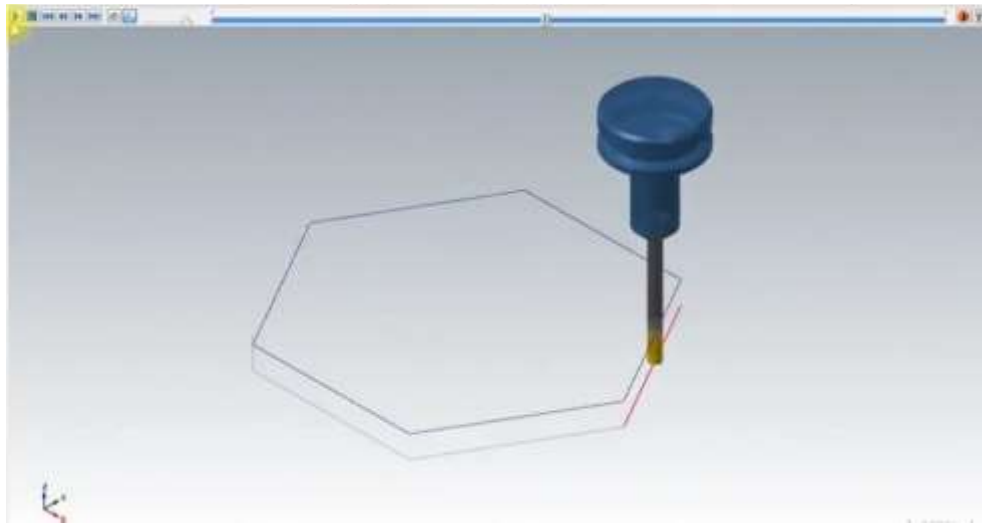


Figura 6. Ejemplo de trayectoria en software de diseño

Posteriormente fue probado en el simulador MACH 3 para verificar su funcionamiento (Figura 7).

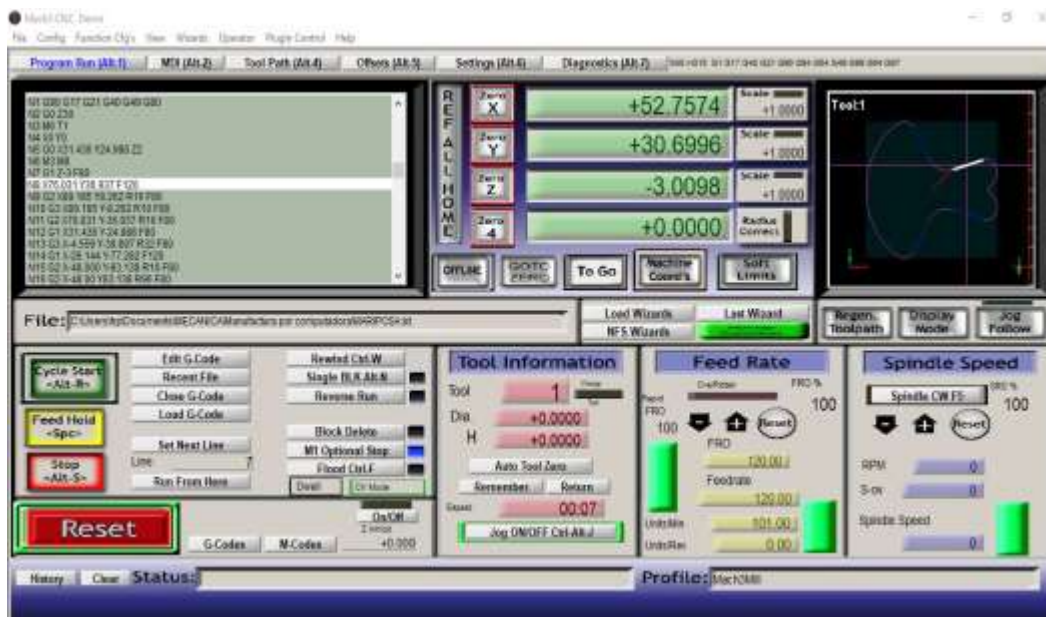


Figura 7. Prueba en software MACH3

Una vez concluido esto, el costo por la fabricación de este elemento es de \$56,000.00, si se compara con equipos similares de estas características el diseño los cuales tienen un costo superior a los \$100,000.00. Por lo cual, es factible de producir y con esto mejorar los procesos dentro de la universidad.

5. Conclusiones

Según los datos expuestos, se puede concluir que la mesa cortadora de plasma cuenta con las funciones requeridas para la realización de su trabajo. En un principio solo se optó por el movimiento en dos dimensiones, sin embargo, existía el problema para que la boquilla alcanzara a cortar materiales con grosor pequeño, fue por ello, que se contempló el mecanismo para el movimiento en el tercer eje. Este mecanismo fue adaptado según las condiciones del PTR utilizado para la fabricación de la mesa.

Como los componentes que se mueven en el eje “X” y “Y” no son de gran tamaño, el cálculo obtenido para la potencia es considerable para el uso de un motor Nema pequeño. Por ello, los motores seleccionados moverán los componentes sin ningún problema, de igual manera si se elige otro motor más pequeño también funcionaría sin problemas.

Existen varias formas de hacer el control de los motores mediante programas y tarjetas controladoras, En este sentido, se consideró la más eficiente y conocida, además de que es la más práctica para el manejo de CNC.

Como consecuencia de la realización de cálculos y diseño en CAD de los componentes para la fabricación de la mesa cortadora, es importante destacar los diagramas de fabricación, en los cuales se especifican dimensiones y el tipo de herramienta utilizada para la realización de las mismas. Ya que esto da una idea más concreta del tipo de material que se puede usar, así como también el costo y tiempo para fabricar cada elemento.

Finalmente, este diseño cuenta con 28 planos que garantizan el ensamble de las piezas diseñadas. Queda como trabajo futuro, la manufactura y construcción de la mesa, así como realizar pruebas de funcionamiento del equipo, esto con el fin de determinar la funcionalidad y poder medir el rendimiento. Se espera que cuando sea plasmado físicamente el diseño, este pueda reducir los tiempos de maquinado dentro de la universidad y se mejoren los acabados en comparación a la parte manual. Adicionalmente con un costo de un poco mas de la mitad de los equipos convencionales, es asequible la construcción.

6. Bibliografía

1. Artiga Rivera, R. W., Bolaños Castillo, G. J., Martínez Rivas, A. A., & Reyes Magaña, E. G., Diseño y construcción de un sistema para corte por plasma, usando técnicas de control numérico computarizado, Tesis Doctoral, Universidad de El Salvador, 2015.
2. Artiga Rivera, R. W., Bolaños Castillo, G. J., & Martínez Rivas, A. A., 2015, "Diseño y construcción de un sistema para corte por plasma, usando técnicas de control numérico computarizado", Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador.
3. Gallardo, J. L. P. Monteagudo, P. E. L. & Carrazana, V., 2004, "Fundamentos eléctricos del corte por plasma", Revista Colombiana, 2(4), pp. 60-62.
4. De máquinas y Herramientas, 2018, "Introducción a la tecnología de Corte por Plasma Mecanizado" de :<https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/corte-por-plasma-mecanizado>.
5. Richard G. Budynas, & J Keith Nisbett, 2012, Diseño en Ingeniería Mecánica, 9na ed, Mc Graw Hill, Nueva York, Cap. 6.
6. Castillo Cisneros, I. W., 2014, "Influencia de la temperatura de revenido a la resistencia a la fatiga del acero AISI 4140", Universidad Nacional de Trujillo

7. Barrera Morales, S. F., 2013, "Análisis de integridad estructural de unión flange-tubería para un minero ducto de cobre mediante método de elemento finito", Repositorio Académico de la Universidad de Chile.
8. Alcalde C, & Christian F, & Bone F, & Edwin G. Diseño de una máquina clasificadora de tomates de 700 [Kg/h] de capacidad. 2013. Tesis de Licenciatura. QUITO/EPN.
9. Pullo taxi Jimenez, L. J., 2016, "Diseño y fabricación de una máquina neumática para realizar 25 bolas de verde de 80 mm de diámetro", Bachelor's tesis, Universidad Politécnica de Salesiana.

Análisis Estático para el husillo de una Máquina de Inyección de Plástico mediante el uso del Método de Elemento Finito.

Carmona-Hernández, E.E.¹, Urriolagoitia-Sosa, G.¹, Romero-Ángeles, B.¹, Urriolagoitia-Calderón, G.M.¹, Lopez-Carrillo, J.E.¹, Pascual-Salgado, I.A.¹

¹Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Adolfo López Mateos – Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e
Investigación, CDMX.

ecarmonah2300@alumno.ipn.mx, guiurri@hotmail.com,
romerobeatriz97@hotmail.com, Ing.juan046@gmail.com,
ipascuals1200@alumno.ipn.mx

1. Resumen

En este trabajo de investigación, se lleva a cabo el análisis estático para el husillo de una máquina de inyección de plástico, esto con el fin de determinar los esfuerzos, deformaciones unitarias y desplazamientos o elongaciones que se presentan en el mismo husillo cuando es sometido a condiciones normales de trabajo y garantizar así la integridad estructural del mismo y por lo tanto de la máquina en su correcto funcionamiento. La herramienta que se utiliza para este caso de estudio es el método del elemento finito el cual es aplicado a través de un software de ingeniería asistida por computadora (CAE), con los resultados obtenidos, se pretende establecer a futuro puntos de optimización para este componente, es necesario recalcar que, aunque el método de análisis puede ser aplicado de forma similar a otros modelos los resultados pueden variar significativamente de manera que este trabajo se ajusta solamente a las condiciones aquí establecidas.

2. Introducción

La industria de la inyección de plástico se ha convertido hoy en día en una de las más importantes a nivel mundial, esto se refleja en lo cotidiano del uso de resinas plásticas, donde quiera que se mire, por lo menos uno de los artículos que estén presentes se ha hecho de materiales poliméricos, ejemplo de ello son la cantidad de piezas plásticas en un automóvil o la diversidad en empaques y envases no sólo para la industria alimenticia, el sector médico o la industria aeroespacial, incluso en el hogar el uso del plástico es sumamente frecuente^[1].

En este sentido, se hace menester para los fabricantes que utilizan la inyección de plástico como medio productivo el contar con equipos eficientes que cumplan con los estándares de calidad en su producción sin que estos representen un problema por la carga de trabajo a la que son sometidos.

Una máquina de Inyección de Plástico es un equipo que se utiliza para la producción masiva de piezas con determinada forma y las mismas características (peso, densidad, propiedades mecánicas), su funcionamiento se puede resumir a grandes rasgos como la introducción de un polímero en estado viscoso, previamente fundido en el barril de inyección, a la cavidad interna de un molde con la forma requerida, el cual se mantiene cerrado por la acción de apalancamiento de un mecanismo conocido como rodillera o bien de un cilindro hidráulico o un servomotor (dependiendo del tipo de unidad de cierre de la máquina utilizada), cuando la cavidad interna del molde se ha llenado y la pieza formada por completo se ha enfriado, el molde se abre activando el sistema de expulsión de la pieza para reiniciar el ciclo nuevamente al cerrarse dicho molde ^[2] (Figura 1).

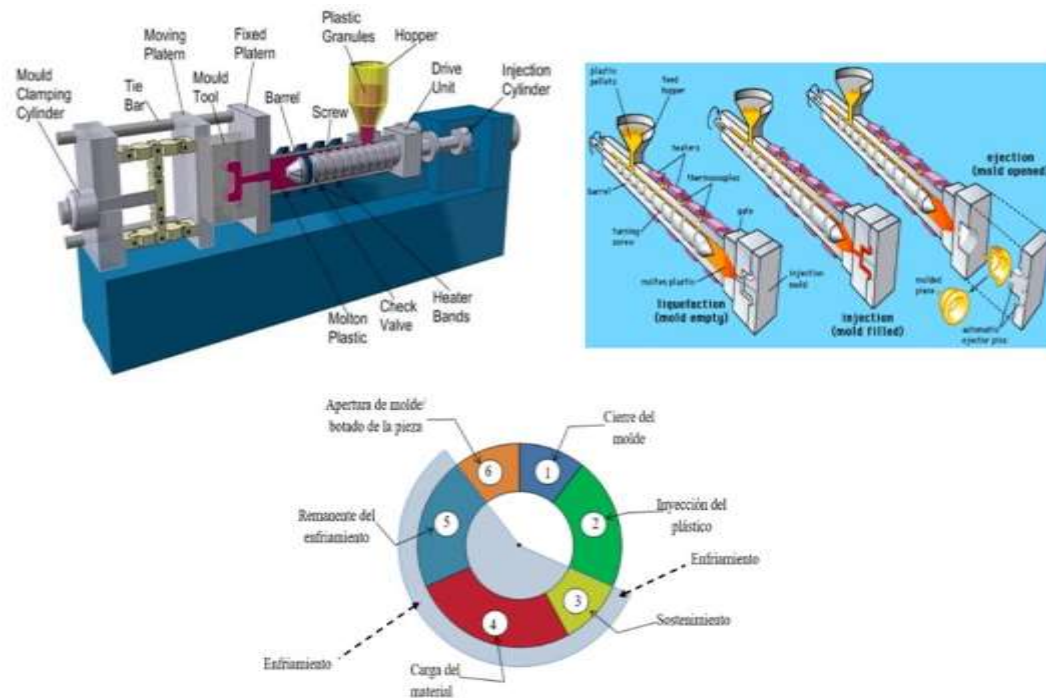


Figura 1.- Proceso de Moldeo por Inyección de Plástico

Generalmente una máquina inyectora está compuesta por tres unidades principales (Figura 2) en las que se incluyen distintos componentes ^[3], estas unidades son:

La unidad de cierre, conformada por las platinas fija, móvil y posterior de la máquina de inyección, la rodillera, el cilindro hidráulico de la platina y las columnas guía. Esta unidad se encarga de la apertura y cierre del molde, así como del apalancamiento del mismo.

La unidad de inyección está integrada por la tolva de alimentación, el cañón o barril, el husillo, la válvula antirretorno, la boquilla de inyección, las resistencias eléctricas y el motor hidráulico; en esta unidad se lleva cabo el proceso de fundición de la resina plástica para luego ser inyectada al interior del molde por los movimientos del husillo.

La unidad de control engloba todos los componentes electrónicos, mecánicos y eléctricos que se encargan de llevar a cabo la activación de los elementos de las unidades de cierre y de inyección además de controlar el proceso mediante un Controlador Lógico Programable (PLC).

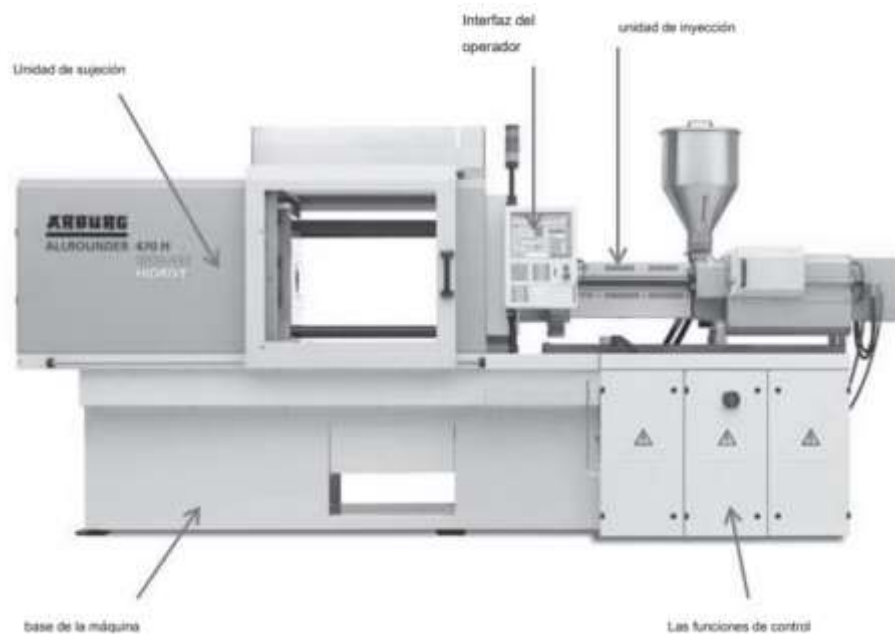


Figura 2.- Unidades de una Máquina de Inyección de Plástico

Como se ha mencionado anteriormente, la unidad de inyección de una máquina inyectora de plástico es la parte en la cual se lleva a cabo la fundición del material plástico mediante la acción combinada en casi un 90% de los esfuerzos de cizalla producidos en el giro del husillo al momento de transportar el material dentro del cañón y un 10 % por el calor que generan las resistencias eléctricas colocadas en la parte externa del cañón; esta unidad también se encarga del llenado de la cavidad interna del molde para obtener

determinada pieza, esto mediante los movimientos lineales del husillo generados por un motor hidráulico ^[4].

En este trabajo de investigación, se lleva a cabo el análisis estático para el husillo de una máquina de inyección de plástico, el cual es sometido tanto a cargas de compresión como de esfuerzo cortante en determinados momentos en específico durante el proceso de moldeo por inyección, este análisis resulta de gran importancia en el proceso de diseño para la correcta selección de materiales para la fabricación de mejores componentes o bien para determinar las cargas que este elemento es capaz de soportar una vez que ya se ha fabricado y sometido a condiciones de trabajo en específico en el momento que el husillo realiza un movimiento lineal para inyectar la resina en la cavidad del molde.

3. Condiciones experimentales

Para establecer las condiciones de trabajo y de frontera, es necesario considerar algunos factores, por ejemplo, la capacidad en volumen de inyección de la unidad, también la viscosidad del material cuando este se encuentra en estado líquido y la presión específica que se requiere para que el material sea inyectado dentro de la cavidad del molde, así como la cantidad de material necesaria para llenar dicha cavidad, esta cantidad también es conocida como tamaño de disparo. Estas condiciones se presentan en la tabla 1

Tabla 1. Condiciones de trabajo en la unidad de inyección ^[1]

Material	Viscosidad	Densidad (Kg/m ³)	Capacidad de la unidad de inyección (g)	Tamaño de disparo (g)	Presión específica (bar)
Polipropileno copolímero	Clase A	900	400	120	800-1000

Para las condiciones de frontera se toma en cuenta las características dimensionales (Figura 3) y propiedades mecánicas del material del que está fabricado el husillo, mostradas en la tabla 2, posteriormente se debe establecer un diagrama de cuerpo libre que nos indique las fuerzas que actúan sobre dicho elemento, así como de las restricciones de movimiento o puntos fijos del mismo (Figura 4).

Las dimensiones del husillo son: 990 mm de longitud y 45 mm de diámetro nominal, una relación $l/d = 22$, el área transversal del álabe es de 5.6 mm

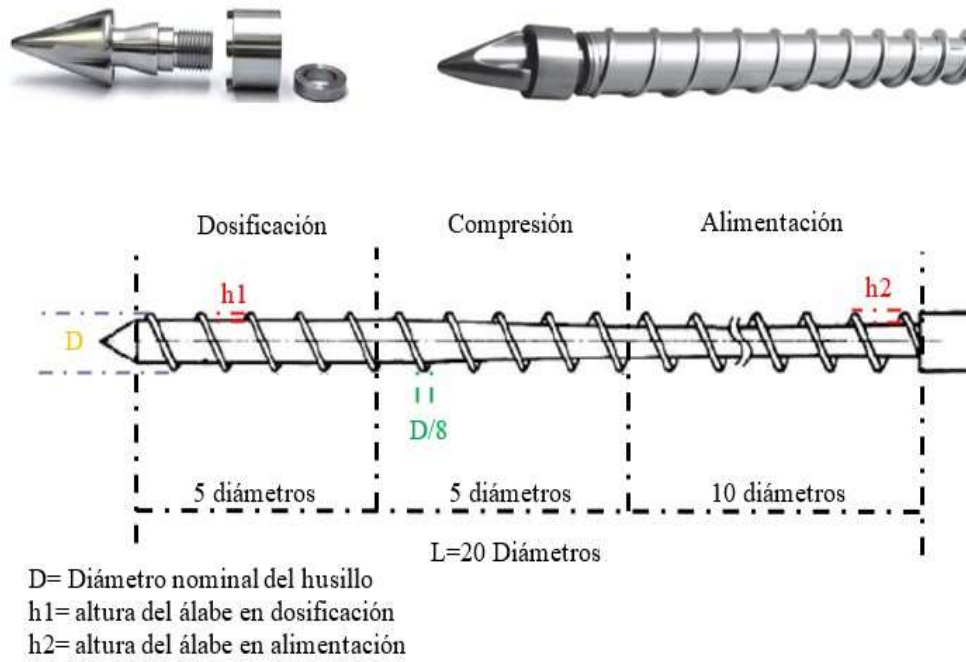


Figura 3.- Características dimensionales del husillo de la unidad de inyección

Tabla 2. Características mecánicas del husillo de la unidad de inyección ^[5]

Componente	Material de fabricación	Densidad g/cm3	Módulo de Young (MPa)	Relación de Poisson	Esfuerzo de Cedencia (MPa)	Esfuerzo a la Tensión (MPa)
Husillo	Acero AISI 1045 (templado)	7.85	206 000	0.29	1259	1825

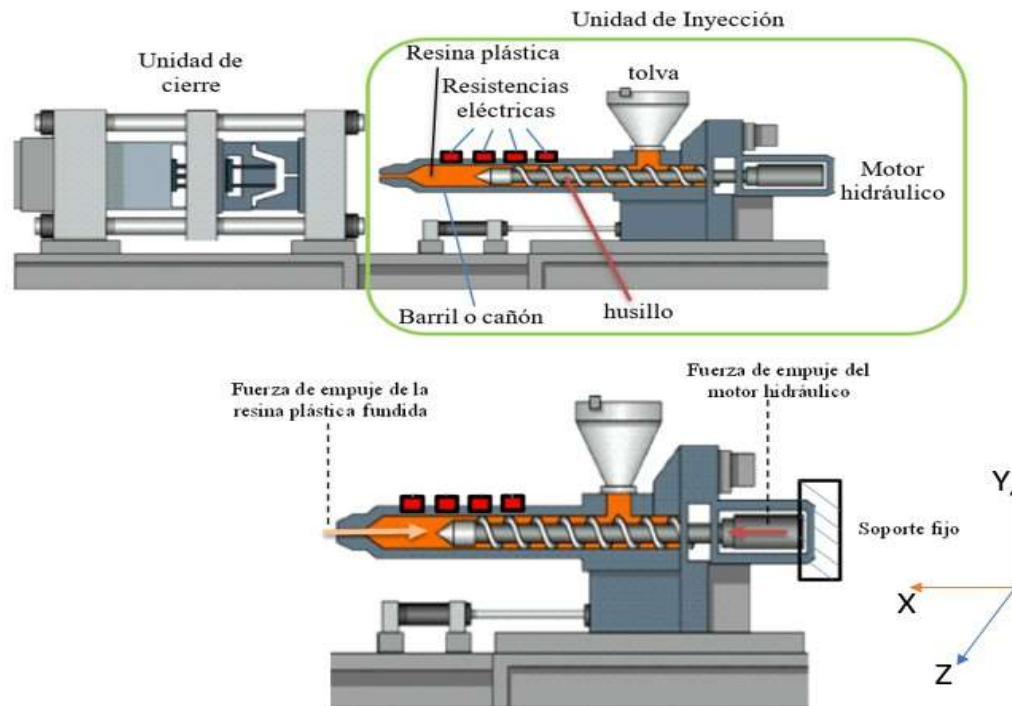


Figura 4.- Diagrama de cuerpo libre del husillo de la unidad de inyección

Una vez obtenidas las fuerzas y restricciones que actuarán sobre el husillo en el momento en que este realiza la inyección del material a la cavidad del molde, se lleva a cabo un modelo virtual tridimensional del mismo, para posteriormente ser discretizado mediante un software de Ingeniería asistida por computadora (Figura 5)

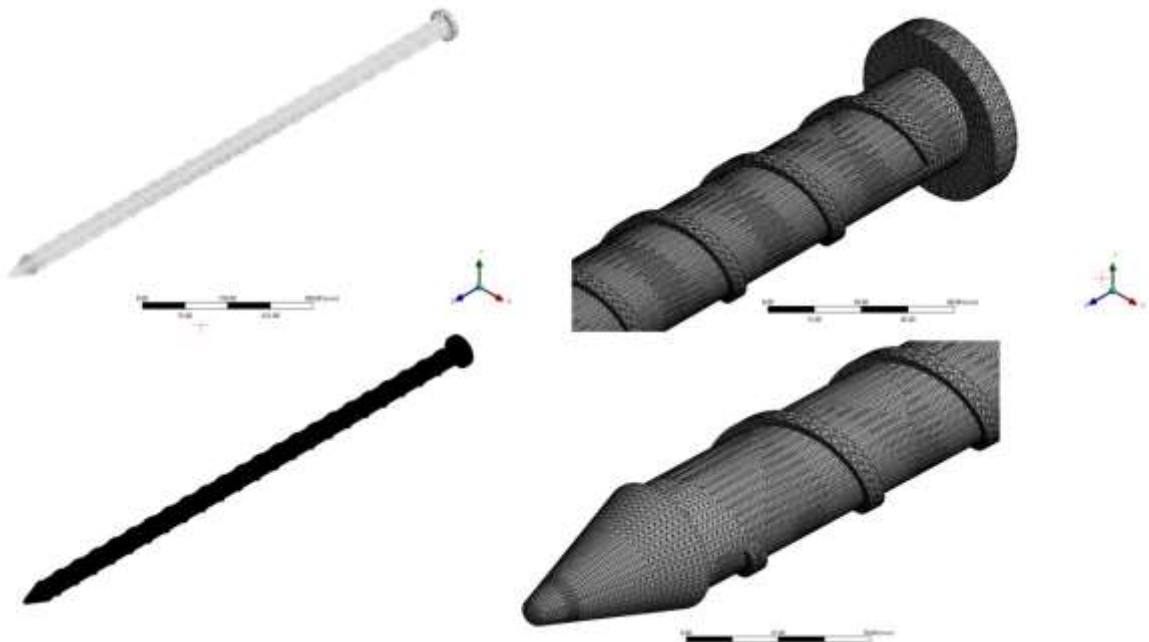


Figura 5.- Modelado y discretizado del husillo de la unidad de inyección

El software que se utiliza para este análisis es *ANSYS Workbench*®, este programa utiliza el método de elemento finito para llevar a cabo los cálculos mediante aproximaciones de matrices vectoriales; Un factor importante para que los análisis sean realizados es el tamaño del discretizado^[6], este debe ser lo suficientemente preciso para que los resultados que se obtengan sean congruentes, si el tamaño del discretizado es grande existirá un menor número de elementos y por tanto una acumulación errónea de los esfuerzos que se puedan presentar, por el contrario, un tamaño de discretizado pequeño aumentará el número de elementos a analizar, pero implicará un mayor recurso computacional y por tanto mayor tiempo para que el programa pueda mostrar los resultados.

4. Resultados y discusión

Habiendo establecido las condiciones necesarias en el modelo virtual, se procede con la solución del ejercicio planteado, solicitando al programa los resultados que se requieren, es decir que el programa es capaz de mostrar distintos resultados sobre los desplazamientos, esfuerzos o deformaciones, las Figuras 6 a 9 muestran algunos de estos considerándose como los más representativos para el análisis propuesto.

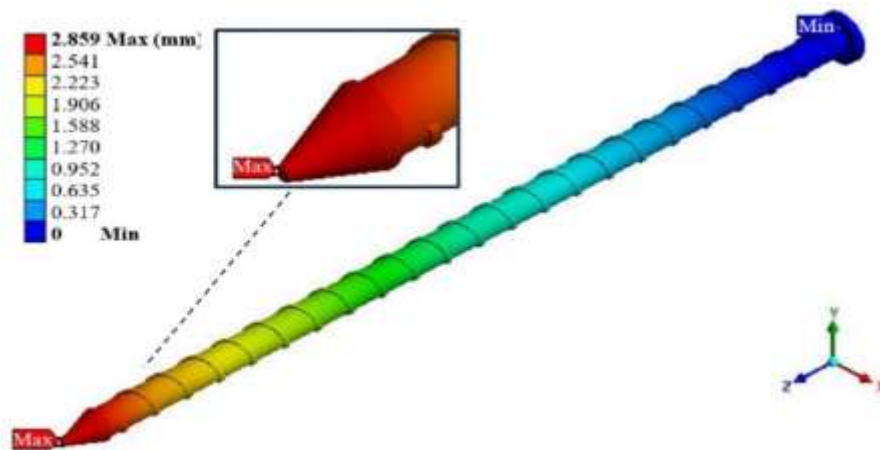


Figura 6.- Desplazamiento del husillo de la unidad de inyección

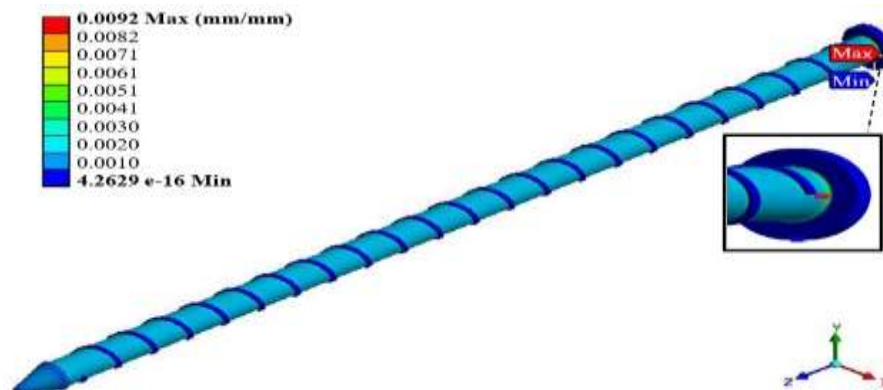


Figura 7.- Deformación elástica del husillo de la unidad de inyección

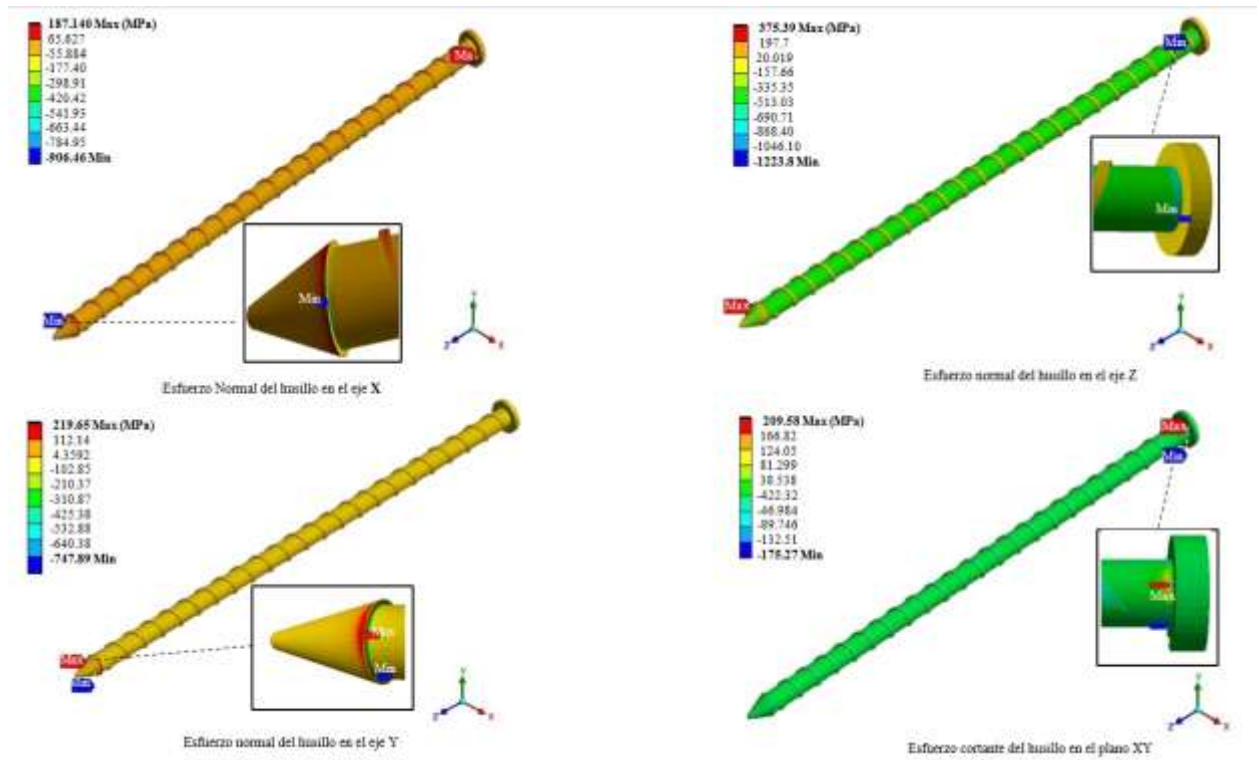


Figura 8.- Esfuerzos Normales (X, Y, Z) y cortante (XY) del husillo de la unidad de inyección

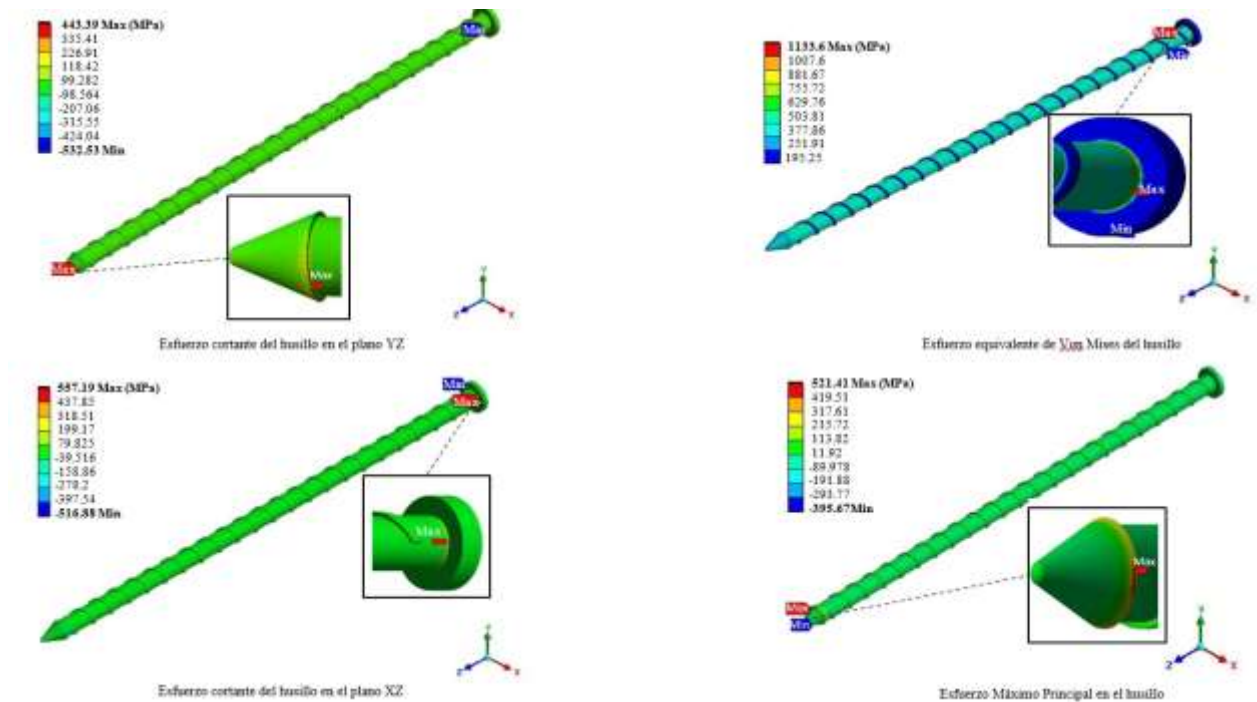


Figura 9.- Esfuerzos cortantes (YZ, XZ), equivalente de Von Mises y Máximo principal del husillo de la unidad de inyección

En la tabla 3 se resumen los resultados del análisis en el husillo de la unidad de inyección de la máquina inyectora de plástico, con estos resultados se puede observar que el husillo se somete a esfuerzos por debajo del esfuerzo de cedencia del material de fabricación (1259 MPa).

Tabla 3. Resultados del análisis estático para el husillo de inyección

Resultado	Magnitud		Unidades
	Máx.	Mín.	
Desplazamiento total	2.859	0	mm
Desplazamiento en eje X	0.0104	-1.9290	
Desplazamiento en eje Y	0.0104	-0.2984	
Desplazamiento en eje Z	4.595 e-5	2.106	
Deformación unitaria Elástica Total	0.0092	4.2629	mm/mm
Deformación en eje X	0.0023	-0.0023	
Deformación en eje Y	0.0024	-0.0019	
Deformación en eje Z	0.0013	-0.0054	
Esfuerzo Normal en el eje X	187.140	-906.46	MPa
Esfuerzo Normal en el eje Y	219.65	-747.89	
Esfuerzo Normal en el eje Z	375.39	-1223.80	
Esfuerzo Cortante en el plano XY	209.58	-125.77	MPa
Esfuerzo Cortante en el plano YZ	443.39	-532.53	
Esfuerzo Cortante en el plano XZ	557.19	-516.88	
Esfuerzo Equivalente de Von Mises	1133.60	195.25	MPa
Esfuerzo Máximo Principal	521.41	-395.67	MPa

Para el caso del signo negativo de los esfuerzos normales, este indica que el elemento esta sometido a esfuerzos de compresión, mientras que los valores positivos muestran un esfuerzo a tensión.

5. Conclusiones

Con el análisis realizado, se puede concluir que, aunque los esfuerzos son un tanto elevados al momento de inyectar el material, estos no rebasan el esfuerzo de cedencia del material del husillo, el mayor esfuerzo normal se presenta en el eje Z, mientras que si se considera un esfuerzo conservador (como aplicación de teoría de falla o un factor de seguridad) en específico el esfuerzo de Von Mises, este arroja un valor de 1.1.

Los resultados en conjunto confirman la integridad estructural del husillo en el instante en que este realiza la inyección del material al interior de la cavidad interna del molde, No obstante, es recomendable complementar este análisis con un ejercicio que incluya las fuerzas cortantes presentes en el momento en que el material es transportado dentro de la cámara del barril o cañón.

Los esfuerzos presentes en el husillo son de compresión y tensión, dependiendo de la zona o nodo en que se ubique siendo estos mayores en la unión entre el husillo y su placa de fijación al motor hidráulico.

Es importante mencionar que este análisis fue realizado bajo determinadas cargas y condiciones relacionadas con la capacidad de la máquina, cualquier modificación de los parámetros aquí establecidos, implica un cambio en los resultados, incluso hasta con máquinas de la misma capacidad, si bien el tipo y proceso del análisis puede ser replicado para otros elementos, quedan sujetas a criterio de quién lo realiza.

6. Bibliografía

1. Centro Empresarial del Plástico, Enciclopedia del Plástico siglo XXI, IMPI, Tomo 1, 2017.
2. Johannaber, F., Injection Molding Machines a User's Guide, Hanser Publishers, 3a edición, 1994.
3. Kamal, M.R., Isayev, A., Liu, S.J., Injection Molding Technology and Fundamentals, Hanser Publishers, 2009
4. Bryce, D. M., Plastic Injection Molding...Manufacturing Process Fundamentals, Society of Manufacturing Engineers.
5. Budynas, R. G., y Nisbett, J. K., Shigley's Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill Education Holdings LLL, 10a edición, 2015.
6. <https://duinto.com/ansys-como-definir-el-tamano-de-malla-fine-y-optimizar-tu-analisis/>

Análisis comparativo del efecto de geometrías tangentes y secantes en la sustentación y arrastre de puntas de avión de proyección individual de geometría base a plano de revolución

Lopez-Carrillo, J. E.¹, Urriolagoitia-Sosa, G.¹, Romero-Ángeles, B.¹, García-García, R.¹, González-Navarrete, A. C.¹, Carmona-Hernández, E. E.¹, Urriolagoitia-Calderón, G. M.¹

¹ Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Unidad Profesional Adolfo López Mateos

ing.juan046@gmail.com, guiurri@hotmail.com, romerobeatriz97@hotmail.com,
rgarciag1801@alumno.ipn.mx, agonzalezn1400@alumno.ipn.mx,
cahe.eden79@gmail.com, urrio332@hotmail.com

1. Resumen

En la presente investigación se comparan cuatro geometrías de plano de revolución, rectas en curvas tangentes como secantes, para analizar el desplazamiento del fluido presentes en aviones y turbinas en un vuelo de tipo crucero subsónico. Para lograr este objetivo, se emplea el Método de Elemento Finito y así validar numéricamente el arrastre y la sustentación generados por cada geometría. El objetivo principal es proporcionar una base sólida de la eficiencia aerodinámica en relación a el arrastre, con el fin de comprender mejor las ventajas y desventajas de cada geometría en el análisis a una velocidad específica. Además, se obtendrán como resultados adicionales las velocidades del fluido alrededor del perfil al momento de ser desplazado y las presiones ejercidas sobre el modelo de cada geometría. De este modo, se asegura que los resultados finales sean beneficiosos para el desarrollo de diseños más eficientes y seguros en la industria aeronáutica.

2. Introducción

Desde la creación de los primeros aviones, el ser humano ha buscado la manera de mejorar su desplazamiento a través del aire, comprendiendo así qué algunas geometrías son más favorables en comparación con otras. Este proceso se ha aplicado desde una base empírica y, posteriormente, se ha analizado a profundidad a lo largo de los años con investigaciones más enfocadas en el diseño ^[1]. Se entiende como concepto principal las diferentes velocidades a las cuales, dentro del espectro de velocidad subsónica y transónica ^[2], los aviones comerciales tienen un vuelo óptimo. Por lo tanto, conocer las geometrías ojivales óptimas para el primer impacto y desplazamiento de un cuerpo diseñado para atravesar el aire es importante.

Los objetivos principales de esta investigación son establecer tablas adaptables a geometrías estándar, donde los tamaños principales de cada una de las puntas geométricas no contienen más allá de la ojiva, lo que permite que su adaptación sea escalable al cuerpo que se desea modificar. Además, se busca hacer complementos proporcionales a la totalidad del radio de bloqueo, que se entiende como la posición frontal de proyección que tiene contacto con el fluido el cuerpo que será desplazado.

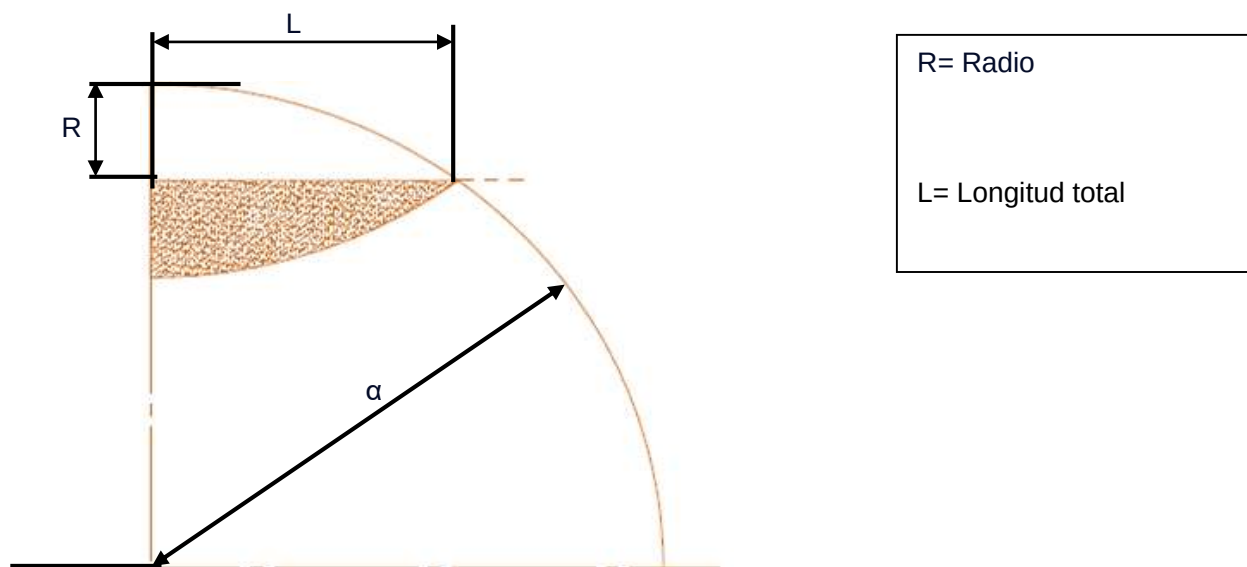
El uso del Método de Elementos Finito ayuda a comprender el comportamiento del fluido alrededor del cuerpo. Los algoritmos matemáticos y las validaciones de este acercamiento numérico implican que las soluciones se aproximan lo más cercano a la realidad. El uso de software, en este caso *ANSYS Fluent*, valida directamente la intervención de conceptos de arrastre y sustentación. Además, establecer la construcción de geometrías tangentes y secantes basadas en figuras

generadas por curvas de sección circulares proporciona una escala base para la estandarización de modelos.

3. Condiciones experimentales

Se establece el concepto de geometría basado en el plano de revolución de la siguiente manera: un plano base principal adaptable, en este caso, bases circulares de 100 mm proyectadas a una longitud de 300 mm (tres veces el diámetro de la base). La curva ojival se genera a partir del uso de secciones cónicas, comenzando con un cuarto de circunferencia. El uso real se produce a partir de la tangente que es tocada por la longitud de la cuerda, que corresponde a la longitud total de la punta, obtenida por la suma de los cuadrados del radio de la base y la longitud total deseada dividida por el diámetro de la base. Este valor se establece únicamente para la geometría tangente.

Por otro lado, para las geometrías conocidas como secantes, se establece la misma longitud y la misma base. Sin embargo, la curva se genera, de igual manera, a partir de una sección cónica, aunque cambia el radio de la circunferencia guía para la curva, la cual tiene que ser mayor que la suma de los cuadrados del radio de la base y la longitud total dividida por la base. Los valores que se establecen para este análisis de la siguiente manera: Un incremento para la primera punta secante del 1.5% con respecto a la base tangencial, para la segunda punta secante del 1.75% con respecto a la base tangencial, y finalmente, para la tercera punta secante del 2.0% con respecto a la base tangencial [3].



$$\text{Razón tangencial} = (R^2 + L^2/2R = \alpha)$$

$$\text{Razón secante} = (R^2 + L^2/2R < \alpha)$$

Figura 1. Plano de revolución tangente y secante base de diseño

$$\text{Punta 1 tangencial} = (R^2 + L^2 = \alpha) = ((100^2 + 300^2)/200)) = 500 \text{ mm} \quad (1)$$

$$\text{Punta 2 a 1.5 \% secante} = (R^2 + L^2 * \alpha') = ((100^2 + 300^2)/200)) * 1.5\% = 750 \text{ mm} \quad (2)$$

$$\text{Punta 3 a 1.75 \% secante} = (R^2 + L^2 * \alpha') = ((100^2 + 300^2)/200)) * 1.75\% = 875 \text{ mm} \quad (3)$$

$$\text{Punta 4 a 2.0 \% secante} = (R^2 + L^2 * \alpha') = ((100^2 + 300^2)/200)) * 2.0 \% = 1000 \text{ mm} \quad (4)$$

Teniendo los planos de revolución, mediante el uso de un software de modelado CAD 3D, se genera el cuerpo a utilizar para este análisis. Este procedimiento se aplica a los cuatro modelos de comparación. La revolución se realiza siempre a favor del eje principal del cuerpo, generando así la punta deseada definida por la geometría

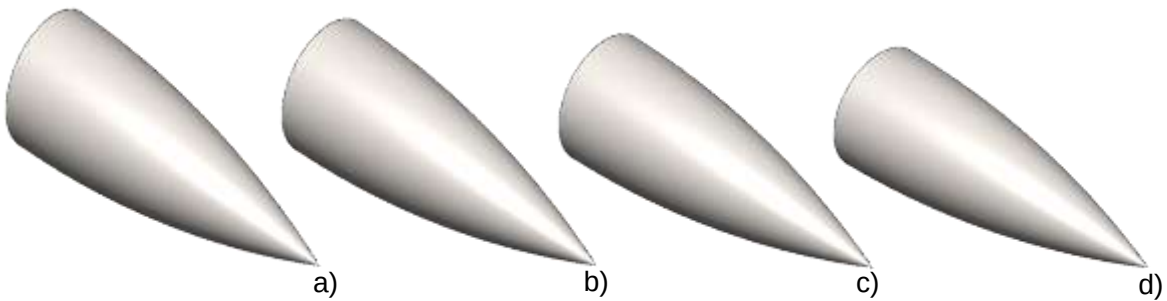


Figura 2. Puntas de avión modeladas base a plano de revolución. a) Punta 1 tangencial. b) Punta 2 a 1.5 % secante. c) Punta 3 a 1.75 % secante. d) Punta 4 a 2.0 % secante.

Se establece, posteriormente, un volumen de control que simulará un túnel de viento físico. Este volumen de control representa el volumen del fluido, en este caso el aire, que será desplazado, y se busca entender cómo es su comportamiento al interactuar con cada uno de los modelos ^[4]. Estos, al tener dimensiones de longitud y base iguales, permiten que la comparación se realice con un mismo volumen general para los cuatro casos, el cual tendrá las dimensiones que se presentan en la figura 3.

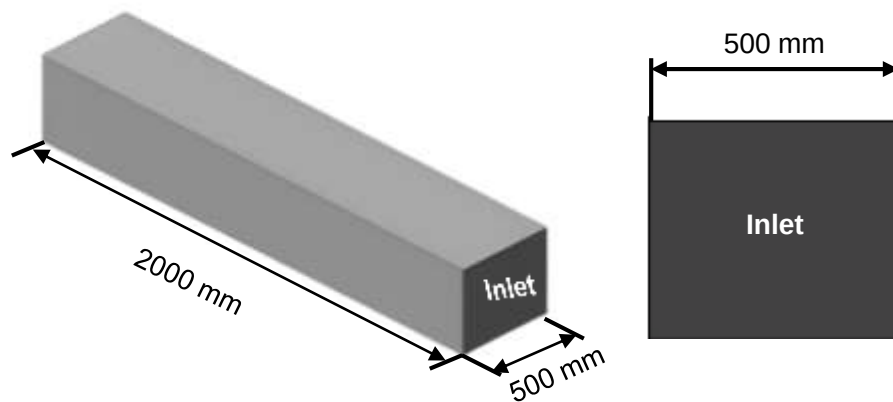


Figura 3. Volumen de control aplicado en los 4 análisis

Para aplicar el Método de Elemento Finito, se lleva a cabo un discretizado uniforme en parámetros para los cuatro casos de análisis, utilizando elementos de manera controlada y de alto orden. Por otro lado, el volumen de control se discretiza de forma controlada a medida que se acerca al área de importancia del modelo, las zonas más próximas al perfil aerodinámico, como se presenta en la figura 4.

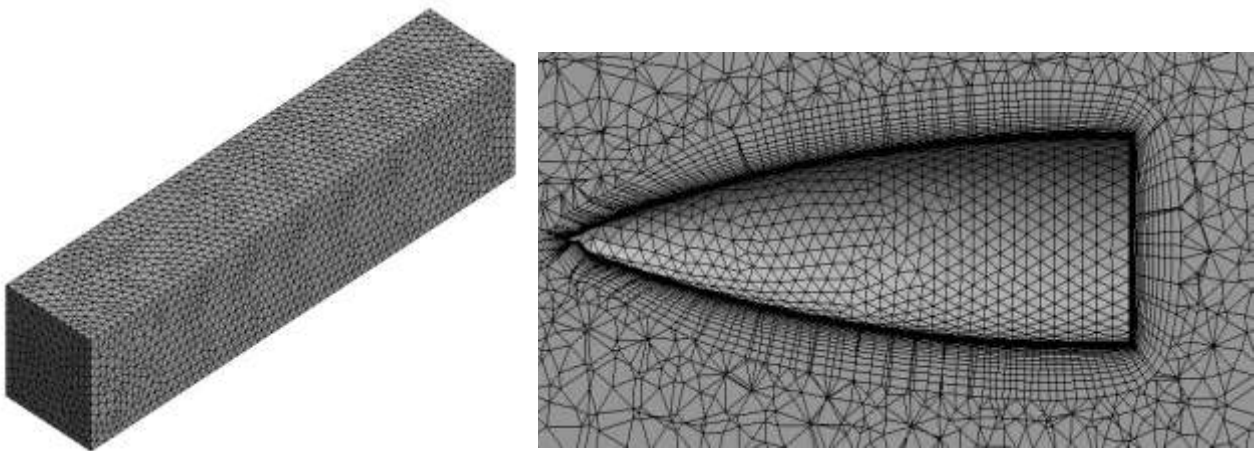


Figura 4. Discretizado de parte próxima al modelo y túnel de viento en Ansys Fluent

Para realizar el estudio, se establecen condiciones de densidad de aire estándar de 1.200 kg/m^3 y una temperatura general de 288.15 K . La dirección del aire fluye en torno al eje de ataque del plano de revolución, y la velocidad del fluido se establece en 14 km/min , velocidad que representa el vuelo de crucero promedio de los aviones de pasajeros ^[5].

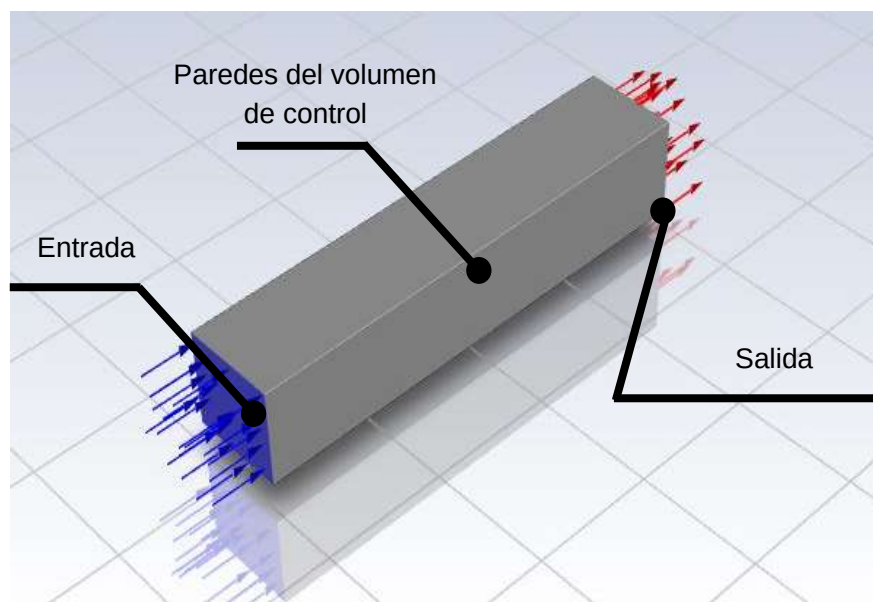


Figura 5. Secuencia del flujo y dirección del túnel de viento representando sus condiciones de frontera

4. Resultados y discusión

Los resultados convergen a 700 iteraciones, asegurando así una comparativa estándar en relación con los cuatro modelos analizados, lo que da como resultado los siguientes valores:

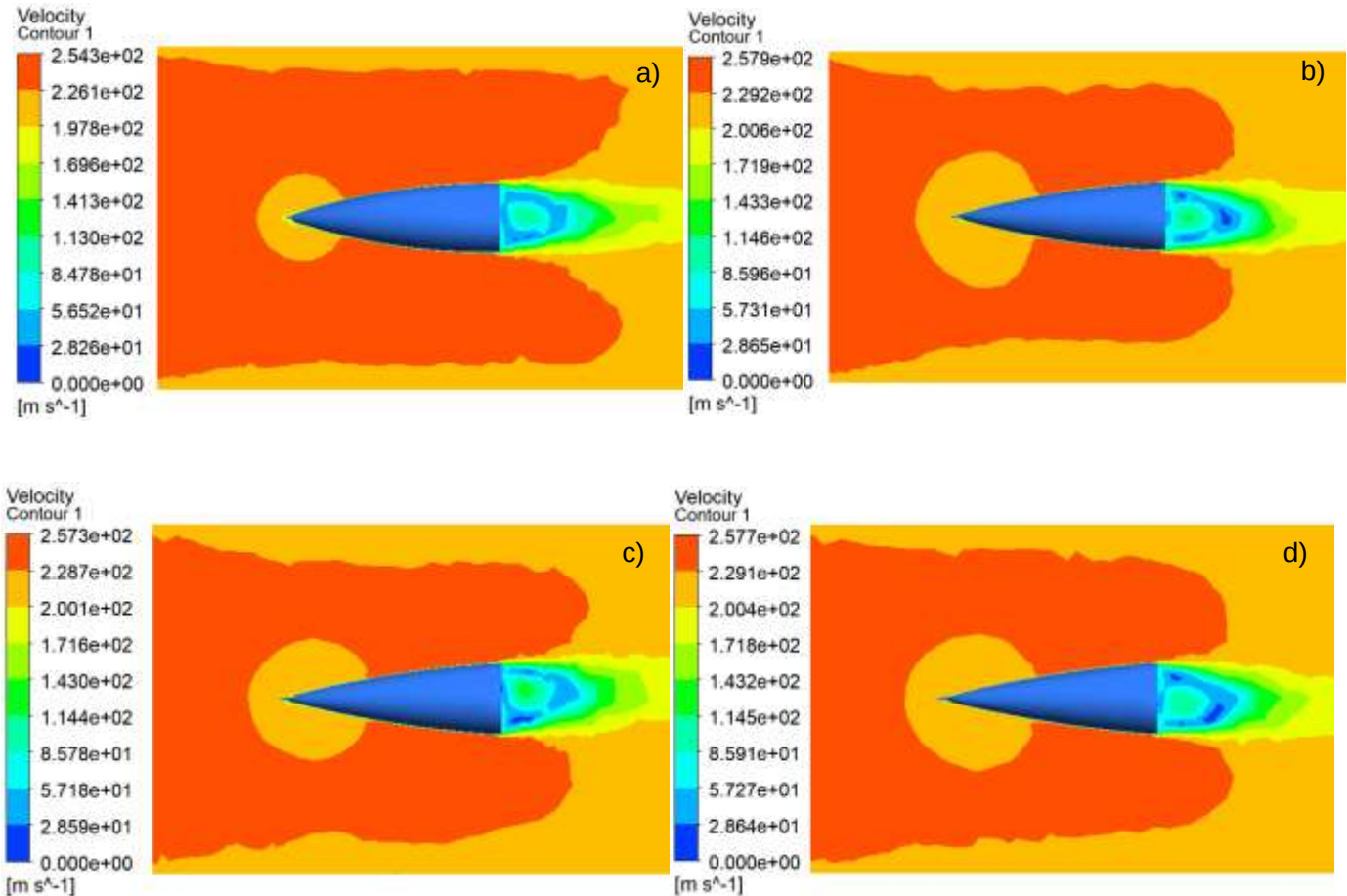


Figura 6. Velocidades de las puntas de avión modeladas base a plano de revolución. a) Punta 1 tangencial. b) Punta 2 a 1.5 % secante. c) Punta 3 a 1.75 % secante. d) Punta 4 a 2.0 % secante.

Los resultados muestran una comparación significativa en las velocidades de cada uno de los modelos del aire alrededor del cuerpo aerodinámico, observándose un

aumento considerable en el modelo de secante punta número 2, mientras que el modelo tangente punta 1 presenta la menor velocidad con una variación mínima.

Tabla 1. Velocidades de puntas tangentes y secantes

Forma	Punta 1 tangencial	Punta 2 a 1.5 % secante	Punta 3 a 1.75 % secante	Punta 4 a 2.0 % secante
Velocidad máxima m/s	2.543×10^2	2.579×10^2	2.573×10^2	2.577×10^2
Velocidad mínima m/s	0	0	0	0

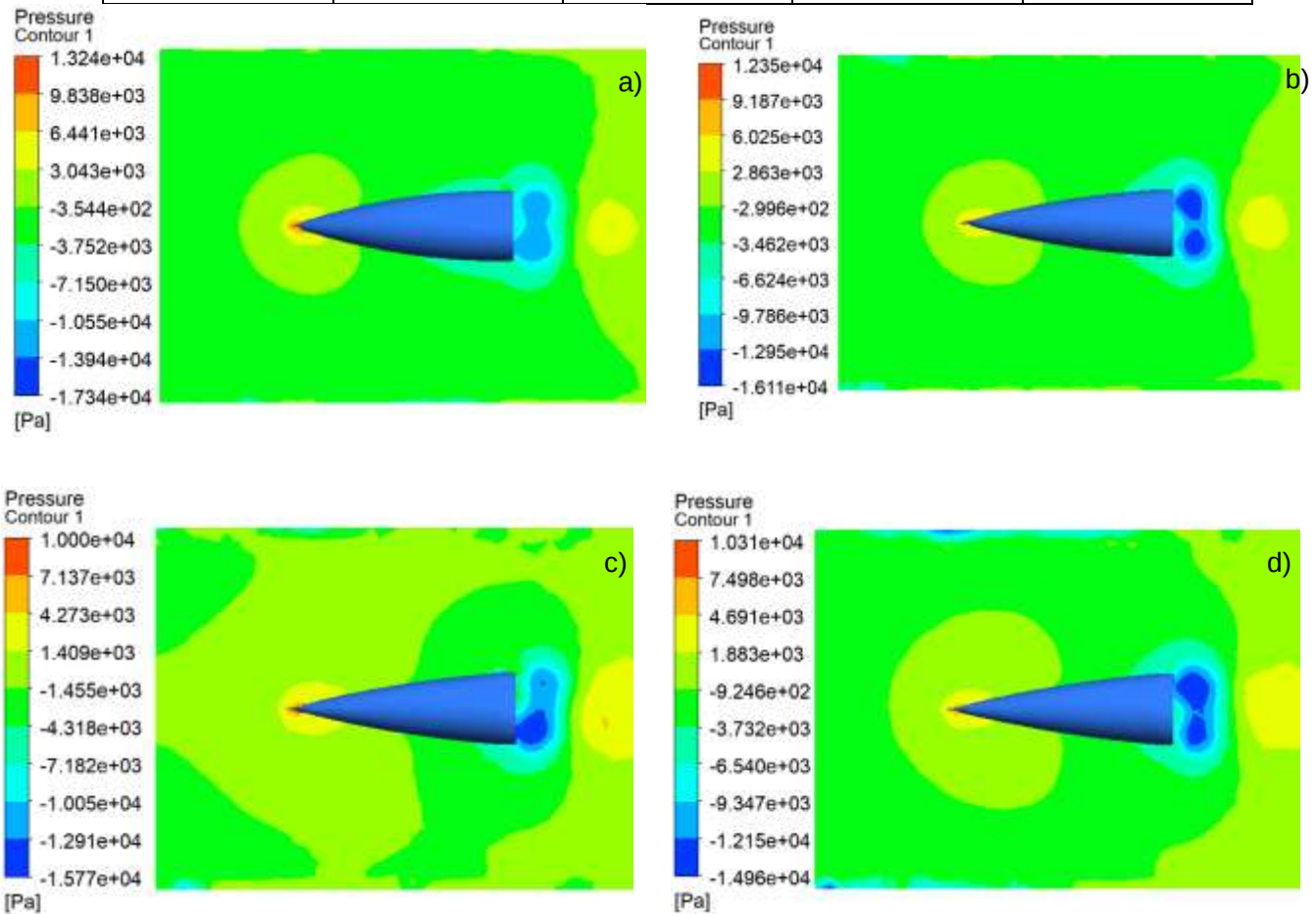


Figura 7. Presiones de las puntas de avión modeladas base a plano de revolución. a) Punta 1 tangencial. b) Punta 2 a 1.5 % secante. c) Punta 3 a 1.75 % secante. d) Punta 4 a 2.0 % secante.

Los resultados muestran una comparación significativa en las presiones de cada uno de los modelos del aire alrededor del cuerpo aerodinámico, observándose un aumento considerable en el modelo secante punta número 2, mientras que el modelo secante punta 3 presenta la menor presión con una variación mínima.

Tabla 2. Presiones de puntas tangentes y secantes

Forma	Punta 1 tangencial	Punta 2 a 1.5 % secante	Punta 3 a 1.75 % secante	Punta 4 a 2.0 % secante
Presión máxima P-a	1.324 x10 ⁴	1.235 x10 ⁴	100 x10 ⁴	1.031 x10 ⁴
Presión mínima P-a	-1.734 x10 ⁴	-1.611 x10 ⁴	-1.577 x10 ⁴	-1.496 x10 ⁴

A continuación se presentan los coeficientes de arrastre y sustentación individual de cada una de las geometrías las puntas:

Tabla 3. Coeficientes de arrastre y sustentación de puntas tangentes y secantes

Forma	Punta 1 tangencial	Punta 2 a 1.5 % secante	Punta 3 a 1.75 % secante	Punta 4 a 2.0 % secante
Arrastre	151.20129	142.43057	151.58332	144.27482
Sustentación	5.92461	5.7296166	20.753895	11.486041
Eficiencia aerodinámica	25.5208	24.8586	7.3038	12.5608

5. Conclusiones

En general, la selección de la forma para la punta de turbinas y puntas de aviones depende de las áreas en las que se desean optimizar. En el caso de que se busque minimizar la resistencia aerodinámica, las puntas secantes al 1.5% y a 2.0%, generan el menor arrastre en comparación con el resto de los modelos analizados. Por otro lado, se observa que una punta secante al 1.75% incrementa considerablemente el arrastre en el vuelo de crucero subsónico de aviones comerciales. Si el diseño se establece para la generación de sustentación mínima, destacan la punta tangente y secante a 1.5% En este caso, la geometría permite un desplazamiento constante a través del fluido sin ningún tipo de turbulencia o desviación en su dirección.

Un valor sumamente importante dentro del área de aerodinámica es el concepto de eficiencia aerodinámica, que engloba el comportamiento de los coeficientes de arrastre y sustentación. Se concluye que la mayor eficiencia radica en vuelos tipo crucero, siendo la punta tangente y secante a 1.5% las que generan una mayor eficiencia aerodinámica total, logrando un equilibrio deseado y un ahorro significativo en vuelo de combustible.

El comportamiento general de cada una de las puntas y la manera en que interactúan con el choque y el desplazamiento uniforme del fluido, junto con la variación de la velocidad, ofrecen una comprensión general de las aplicaciones proporcionales a la geometría total de aeronaves. Sin embargo, es importante recalcar que, para condiciones de vuelo totales no ideales, los objetivos y el rendimiento llevan diversos parámetros y condiciones de frontera para análisis de manera progresiva en todas las fases del vuelo. No obstante, el vuelo de crucero es la fase más larga en vuelos comerciales.

6. Bibliografía.

1. Wegener P. P., "What makes airplanes fly?: history, science, and applications of aerodynamics", Second Edition, Springer Science & Business Media., 1997.
2. Lopez-Alegria I. F., "Diseño de un túnel de viento de circuito cerrado a escala para fines académicos y de investigación", Chapter 1, Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.
3. Parvez D., y Chalia S., "Research on the aerodynamic performance of elliptical and secant nose cones", V. 5, International Journal of Research and Engineering Trends, 1997.
4. Joaquim R. R., "Aerodynamic Design Optimization: Challenges and Perspectives", V. 239, Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, 2022.
5. Nguyen M. T., Nguyen N. V., y Pham M. T., "Aerodynamic analysis of aircraft wing", V. 31, Journal of Science: Mathematics-Physics, 2015.

Comparación de análisis numérico y analítico del esfuerzo de Von Mises en el riel de un CubeSat 2U.

Ing. García-García, R., IPN, ESIME, SEPI Zacatenco Dr. Urriolagoitia-Sosa, G., IPN, ESIME, SEPI Zacatenco Dra. Romero-Ángeles, B., IPN, ESIME, SEPI Zacatenco Ing. Mondragón-Hernández, I., IPN, ESIME, SEPI Zacatenco -, Ing. Lopez-Carrillo, J. E., IPN, ESIME, SEPI Zacatenco

¹Instituto Politécnico Nacional, ESIME, SEPI Zacatenco.

rgarciag1801@alumno.ipn.mx

guiurri@hotmail.com

romerobeatriz97@hotmail.ipn.mx

imondragonh1800@alumno.ipn.mx

ING.juan046@gmail.com

1. Resumen

En este trabajo se lleva a cabo una comparación entre un análisis numérico y uno analítico del esfuerzo de Von Mises en el riel de un CubeSat 2U. Teniendo como objetivo poder proporcionar una base sólida para la validación del riel, además de que en el proceso se puede comprender mejor las características, ventajas y desventajas de cada enfoque en los análisis, al hacerlo se asegura que los resultados finales sean precisos y confiables para la aplicación del riel en un CubeSat 2U.

2. Introducción

Los problemas pueden resolverse de diversas maneras, ya sea el caso que se aplique un análisis numérico o analítico, la elección de entre estas opciones depende de la complejidad del problema, ya que en ocasiones donde se presentan geometrías de bastante dificultad y lo más recomendable serán los análisis numéricos dado que para los analíticos puede no existir alguna solución ^[1].

Para la elaboración de un CubeSat, existen especificaciones dictadas por normas las cuales son prioridades a seguir, ya que garantizan el éxito de las misiones. En este trabajo se utilizan las especificaciones del CubeSat Design Specification (CDS) ^[2]. Los rieles cuentan con características definidas, teniendo así un ancho de 8.5 mm con un redondeo en los extremos de 1 mm ^[3].

Gracias a estas normas previamente establecidas, se diseña el riel del CubeSat 2U utilizando un software CAD y posteriormente, se determinan las condiciones a las que se someterá. Por ello, se decide realizar una validación mediante un análisis numérico y analítico. En el análisis numérico se lleva a cabo mediante una simulación del esfuerzo de Von Mises mediante el método de elementos finitos con ayuda del software ANSYS para estudiantes.

3. Condiciones experimentales

El primer análisis con el que se comenzará será el análisis analítico ya que estos proporcionan casos de pruebas útiles para validar los análisis numéricos antes de aplicarlos a problemas más complejos para los cuales en ocasiones no existen soluciones analíticas conocidas, en este caso el riel presenta una geometría simple y por tanto se puede analizar de ambas formas.

La fuerza a la que se someterá el riel es de 62N en la parte superior, siendo así una fuerza que se aplica en el eje Y la cual presentara un esfuerzo por temperatura y por carga, se calcula el esfuerzo por temperatura de la siguiente manera ^[4].

$$\sigma_T = (\alpha)(E)(\Delta T) \quad (1)$$

$$\sigma_T = (22.78 \times 10^{-6} \frac{m}{m^{\circ}C})(69040 MPa)(2.2207^{\circ}C) = 3.4925 MPa \quad (2)$$

Los datos usados para determinar el esfuerzo por temperatura fueron obtenidos de las características del material Al 6061.

Continuando con el cálculo del esfuerzo por carga ^[5].

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{-62N}{72.25mm^2} = -0.8581 \frac{N}{mm^2} \text{ o } -0.8581 MPa \quad (4)$$

Una vez que se determinan los esfuerzos por temperatura y por carga, se suman ambos esfuerzos con el fin de poder determinar el máximo esfuerzo, los cuales estarán actuando en el eje y, donde se obtiene lo siguiente $\sigma_x = 0$, $\sigma_y = 2.6344 \text{ MPa}$ y al no tener ningún esfuerzo de flexión $\tau_{xy} = 0$, continuando con la determinación del esfuerzo de Von Mises de la siguiente manera

El primer esfuerzo a obtener es el esfuerzo normal máximo, con el cual se obtendrán sigma 1 y sigma 2, los cuales ayudarán a determinar el esfuerzo de Von Mises.

$$\sigma_p = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (5)$$

$$\sigma_p = \frac{2.6344 \text{ MPa}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{-2.6344 \text{ MPa}}{2}\right)^2} = 2.6344 \text{ MPa} \quad (6)$$

Se utilizará solo sigma 1, ya que sigma 2 es igual a 0 y con esto se obtiene el esfuerzo de *Von Mises*

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 * \sigma_2} \quad (7)$$

$$\sigma' = \sqrt{(2.6344)^2} = 2.6344 \text{ MPa} \quad (8)$$

También se calculará el factor de seguridad que poseerá el riel, con el fin de validar si será capaz de soportar la fuerza a la que se le someterá en el análisis, el calcular el factor de seguridad ayuda a validar la resistencia del riel bajo las condiciones especificadas en el análisis y garantiza que no falle durante su uso, proporcionando una medida adicional de seguridad.

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (9)$$

$$N = \frac{260 \text{ Mpa}}{2.6344 \text{ MPa}} = 98.6941 \quad (10)$$

Para el análisis numérico se toman las siguientes consideraciones, al igual que en el análisis analítico se agregan las propiedades del material en este caso es un Al 6061, posterior a esto se determinan las condiciones de frontera teniendo la parte inferior del riel como soporte fijo y la parte superior libre, una vez realizado esto se aplica una fuerza de 62N que será la fuerza a la que estarán sometidos los rieles de un CubeSat 2U en este análisis.

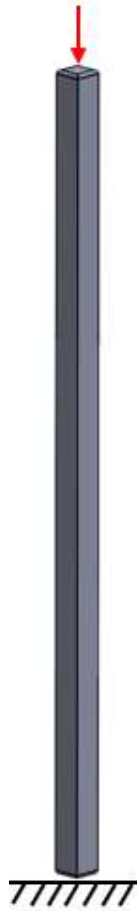


Figura 1. Consideraciones para el Riel

En el discretizado utilizado para el análisis del riel se usó un sizing de 3 mm aplicado a todo el riel.

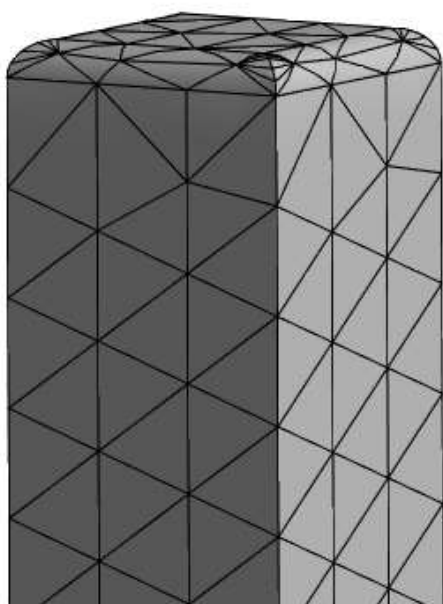


Figura 1. Discretizado aplicado en el Riel

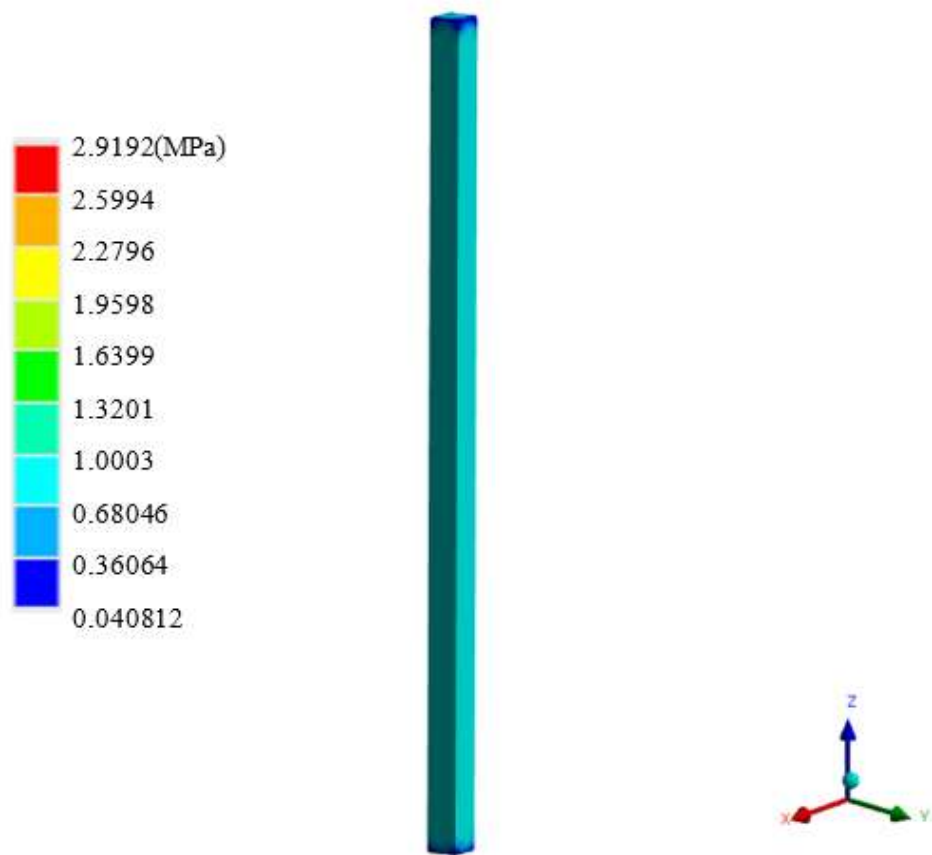


Figura 1. Esfuerzo de Von Mises en el Riel

La parte inferior del riel será la que contenga el mayor esfuerzo debido a que se está comportando a compresión y en este caso en esa parte hay mayor acumulación de material.

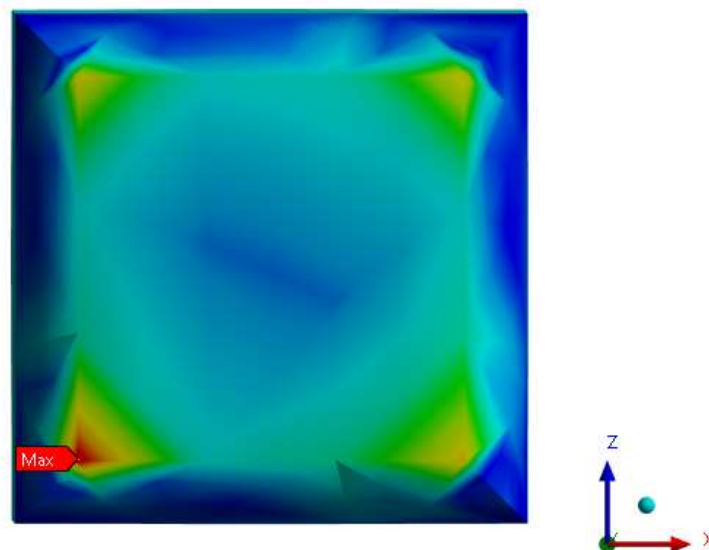


Figura 3. Acercamiento a la zona con mayor esfuerzo en el Riel

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos de ambos análisis muestran una variación mínima debido a que los parámetros utilizados, como las propiedades del material son las mismas para ambos análisis y la variación obtenida en los resultados se debe a que los análisis numéricos pueden enfocarse en geometrías mas complejas, lo que permite un análisis mas detallado y preciso, en contraste, los analíticos tienden a ofrecer soluciones mas lineales y simplificadas, adecuadas para geometrías menos complejas.

Tabla 1. Comparacion de resultados obtenidos

Concepto	Análisis Analítico	Análisis Numérico
Esfuerzo de Von Mises (Mpa)	2.6344	2.9192

5. Conclusiones

Se realizo una comparativa entre el análisis numérico y analítico no con el objetivo de determinar cuál es mas preciso o funcional, sino para examinar el amplio abanico de oportunidades y limitaciones que ambos ofrecen, al identificar las diferencias y complementariedades de ambos métodos, se busca utilizarlos en conjunto para proporcionar una mayor validación en estudios y trabajos. En este caso, se aplica dicha comparativa para estudiar la veracidad y aptitud de un riel destinado a su uso en un CubeSat 2U, asegurando así la fiabilidad del uso de este.

6. Bibliografía

1. Perrera, W., Schwenk, C. y Rethmeier, M., Comparison of analytical and numerical welding temperature field calculation, Computational Materials Science, N. 4, V. 47, 1007-1014, 2010.
2. CubeSat Design Specification, The CubeSat Program, Cal Poly SLO, Rev.14.1, CP-CDS-R1.1, 2022.
3. Herrera-Arroyave, J. E., Bermúdez-Reyes, B., Ferrer-Pérez, J. A. y Colín, A., Cubesat system structural design, In 67th International Astronautical Congress, Guadalajara, México, 1-7, 2016.

4. Mott, R. L., Salas, Resistencia de materiales, Pearson Educación, V. 5, 2009.
5. Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., Mazurek, D. F., Mecánica de materiales, Mcgraw Hill Education, V. 7, 2017.

Diseño y construcción de un banco dinamométrico para motores de hasta 500 hp

Vázquez, J.R.,¹ Farfán, I.A,¹ , González, F,¹ , González,R,¹, Esquivel, R C,² , Rincón, P,¹ , Vicente, W,²

¹ UNICE, Facultad de Ingeniería, UNAM.

² UNICE, Instituto de Ingeniería, UNAM.

jricardovdd@gmail.com, ahdinalp@hotmail.com, frangopi@hotmail.com, rog1950@unam.mx,
resquivelh@iingen.unam.mx, pirg@unam.mx, WVicenteR@iingen.unam.mx

1. Resumen

El proceso de diseño está compuesto por distintas metodologías, para el diseño de este dinamómetro se utilizaron ciertos aspectos de las metodologías de Dieter y Ulrich, dividiendo el trabajo en cuatro partes. El primer paso es el análisis y delimitación del problema identificando los requisitos de la Unidad de Investigación y Control de Emisiones (UNICE). El segundo paso es hacer el diseño conceptual a partir de una serie de lluvias de ideas para aproximar las posibles soluciones. El tercer paso es evaluar las propuestas de solución por medio de una matriz ponderando con los requerimientos entre los cuales están: contar con las medidas de seguridad necesarias, que sea modular, entre otras. Al concluir la fase de diseño se procedió a la construcción por métodos de manufactura tradicional tales como corte por desbaste, soldadura con electrodo revestido.

2. Introducción

La unidad de investigación y control de emisiones (UNICE) es un grupo de investigación de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) el cual tiene un compromiso ambiental relacionado con las emisiones contaminantes de los vehículos automotores, al igual que investigar y promover las nuevas tecnologías para el control de emisiones en el país. Sus líneas de investigación requieren de dinamómetros para hacer distintos tipos de ensayos a motores. Para ello cuenta con dos dinamómetros de chasis (uno para vehículos ligeros y otro para motocicletas) y un dinamómetro de banco para motores de hasta 300 hp. Por lo anterior, es necesario un dinamómetro para motores de mayor potencia, ya que 300 hp limita de manera importante la cantidad y tipo de motores que se pueden estudiar ya sea para investigación o para análisis a la industria. Es a partir de esta necesidad que se planteó el diseño y construcción de un dinamómetro de banco para motores de hasta 500 hp.

Un dinamómetro de banco es un equipo empleado en diversos estudios sobre MCIA (Motores de combustión interna alternativos), por ejemplo, caracterizar un motor, hacer pruebas con aditivos, combustibles alternativos (biodiesel) o mezclas de combustibles (etanol y gasolina), entre otros. Los bancos dinamométricos se pueden diseñar por módulos, es decir por partes en la mayoría de las ocasiones se tienen 3 módulos: Chasis inferior, chasis superior y el soporte del motor. El primer módulo es el chasis inferior, el cual es la conexión del banco dinamométrico con el piso y sirve soporte para el freno y el motor. El segundo módulo es el chasis superior, el cual se encarga de soportar al freno o unidad de absorción de potencia (PAU, por sus siglas en inglés), el cual aplica carga al motor sometido a prueba. El tercer módulo es el soporte del motor, el cual se encarga de conectar el motor al chasis y se asegura de que no se mueva fuera de un intervalo esperado dado por los soportes de motor o silentblock.

El proceso de diseño para el banco dinamométrico tomó aspectos de los métodos de Dieter y Ulrich, el cual consiste en cuatro etapas: análisis y delimitación del problema, diseño conceptual, desarrollo de la solución y construcción.

Si bien hay etapas bien definidas sobre lo que se debería de hacer en cada una de ellas. Diseñar no es un proceso lineal, sino que se caracteriza por ser bastante sensible al cambio porque durante todo el proceso puede haber ideas, configuraciones, necesidades, materiales, etc. que simplemente no sean viables porque: no cubren las necesidades solicitadas de manera satisfactoria, complican el posterior mantenimiento, no se pueden conseguir o hacer con lo que se tiene en el momento, tomarían demasiado tiempo, etc. En la etapa de análisis y delimitación del problema se establecieron las necesidades, detalles y requisitos con los que debe de cumplir el dinamómetro, los cuales son:

- Ser preciso y exacto en sus mediciones teniendo un porcentaje de error en las mediciones del 2%.
- Contar con medidas de seguridad suficiente y adecuada para los operarios.
- Utilizar la PAU, flecha cardan, torres de nivelación o en caso de necesitar algo, que estos sean del menor costo posible.
- Tener un diseño modular para permitir montar motores de distintas dimensiones.
- Que provoque la menor cantidad de vibraciones cuando esté en funcionamiento.
- Contar con una instrumentación capaz de medir la velocidad angular el motor, el par generado.

Con estos requisitos se ponderó en la tabla 1 la importancia de cada requerimiento para tenerlo en cuenta en posteriores etapas del diseño, la ponderación se realizó en una escala del 1 al 5 en donde el 5 es muy importante y el 1 es no importante. Donde uno de los componentes más importantes del dinamómetro es la PAU, pues este va a delimitar los motores que se puedan utilizar en el dinamómetro.

Tabla 1: Requerimientos con nivel de importancia.

Requerimiento	Importancia
Tener un F.S mayor a 2	5
Tener una exactitud del 98%	5
Adquisición de la menor cantidad de material posible	3
Diseño modular	5
Disminuir al máximo las vibraciones en funcionamiento	4
Utilizar la PAU con la que se cuenta	5
Soportar un mínimo de 4000 RPM	5

Al haber delimitado el problema con las necesidades planteadas por el laboratorio, se realizó una lluvia de ideas para dar posibles soluciones. Para ello se dividió el dinamómetro en tres partes:

- Chasis inferior
- Chasis superior y fijación de la PAU
- Fijación del motor

3. Condiciones experimentales

Una vez expuestos los requerimientos del dinamómetro, se investigó la ficha técnica de la PAU con el que se cuenta en la unidad, el cual es un Telma AC 61-25 Retarder de 192 kg de peso. En la figura 1A se observan las curvas de absorción de par dependiendo de la fase de frenado (1, 2, 3, 4). Las fases de frenado hacen referencia a la cantidad de bobinas que se alimentan en cierto momento y se determina en función de la velocidad angular del motor. Por lo tanto, se puede observar que este freno tiene un punto de absorción máximo de 1400 N m en un intervalo de 0 a 1000 rpm. Después de dicho intervalo, la absorción de par disminuye con tendencia casi lineal hasta 1000 Nm a una velocidad angular máxima de 4000 rpm.

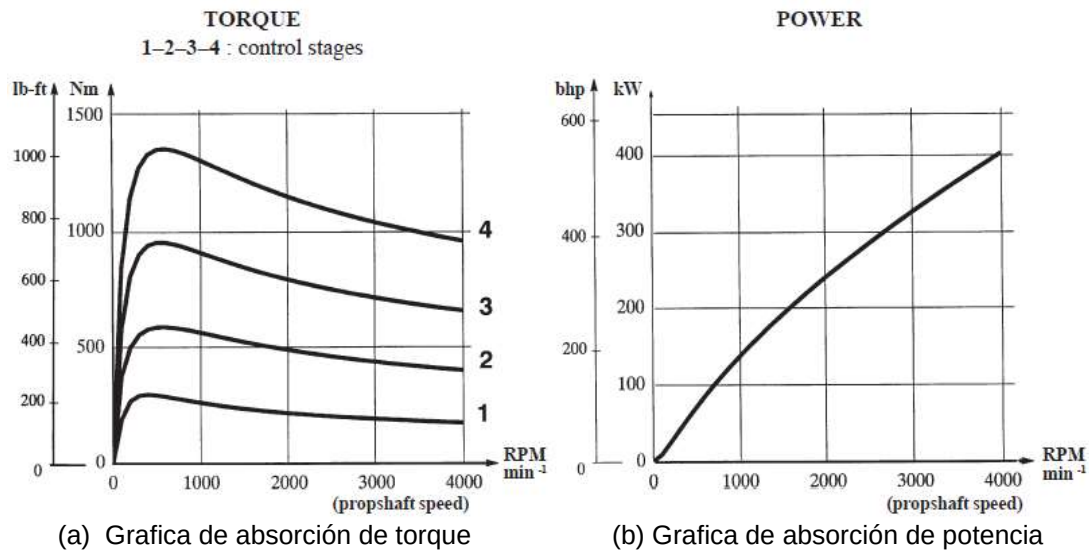


figura 1: Gráficas de funcionamiento de la PAU ^[1]

En la figura 1B se observa que la potencia máxima absorbida por el freno es de 400 kW o 536.4 hp a 4000 rpm. Con estos datos, los motores que pueden ser sometidos a prueba son, idealmente, los de encendido por compresión; esto debido a que producen un par elevado a una reducida velocidad angular, comparados con los motores de encendido provocado. Sin embargo, este freno puede ser utilizado con motores de encendido provocado, siempre y cuando no se supere una velocidad de 4000 rpm.

Conocer los datos del freno, en específico el intervalo de funcionamiento de revoluciones por minuto, permitió seleccionar unas chumaceras adecuadas, por lo que después de investigar en distintos distribuidores se seleccionaron las siguientes chumaceras las cuales son el soporte de pie para rodamientos de inserción marca SKF modelo SY 509 M ^[2] y un rodamiento insertable marca FAG modelo UC210 ^[3]. Estos elementos tienen la capacidad de soportar tanto el peso de la PAU como el régimen de velocidad del motor.

Para realizar un diseño que satisfaga las necesidades de la unidad se realizó un proceso iterativo hasta llegar a una solución que cubra la mayor cantidad de requerimientos solicitados. La primera iteración del chasis inferior se enfocó en la facilidad de construcción y de mantenimiento, pues está conformado por largueros, torres de nivelación y travesaños que funcionan como soportes de motor, la desventaja de este diseño es la poca rigidez que ofrece el chasis. El resultado se puede ver en la figura 1 con la respectiva descripción de cada componente



Figura 1: Primera iteración del chasis inferior, siendo A largueros, B travesaños y C torres de nivelación

A: largueros encargados de soportar el peso de la PAU

B: travesaños encargados de soportar el peso del motor

C: torres de nivelación para unir la fijación del freno con el chasis inferior si están en los largueros y para fijar el motor con los travesaños. Además de que al tener un tornillo y tuerca permiten modificar la altura del motor y la PAU.

Posterior a la primera iteración, se realizaron 3 más. En la cuarta iteración se solucionaron los problemas de rigidez del chasis al incorporar dos travesaños que sirven como base para la PAU, reducen el centro de gravedad del dinamómetro al poner la PAU más cerca del piso e incrementan la cantidad de puntos de anclaje del dinamómetro. La desventaja de este diseño es la complejidad en el mantenimiento, ya que se requiere desmontar distintos componentes. En la figura 2 se observa la cuarta iteración con la descripción de cada uno de sus componentes

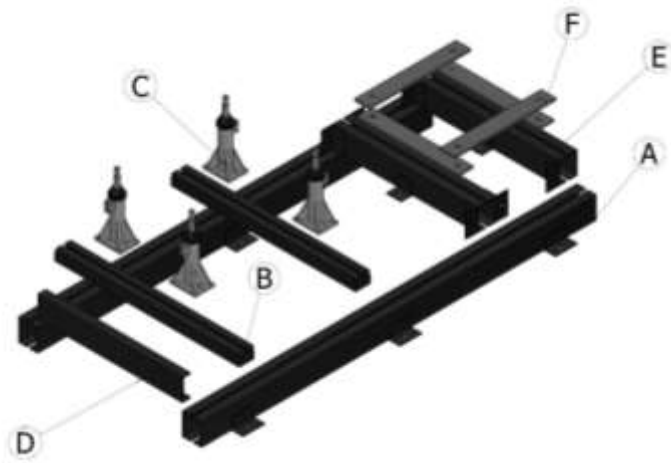


Figura 2: Cuarta iteración del chasis inferior, siendo A langueros, B travesaños y C torres de nivelación, D travesaño frontal, E soportes transversales del freno, F placas elevadoras.

En la figura 2 se pueden ver unos globos con letras que a continuación se explican que componente hace referencia

A: Langueros encargados de soportar el peso del motor y de la PAU, así mismo tiene la función de riel para el ajuste de la distancia entre la PAU y el motor, así como la distancia entre los soportes del motor.

B: Soportes de motor encargados de soportar el peso del motor y a su vez las torres de nivelación, estos tienen la función de transmitir el peso del motor sometido a prueba a los langueros, al igual que dar rigidez al chasis.

C: Torres de nivelación encargadas de ajustar la altura del motor para poder asegurar la alineación de la PAU y del motor.

D: Travesaño frontal, encargado de aumentar la rigidez del chasis.

E: Soportes transversales del freno, encargados de soportar las torres de nivelación para el soporte de la PAU.

F: Placas elevadoras, encargadas de funcionar como un espaciador para asegurar la alineación del motor con el eje de rotación de la PAU.

Posterior al diseño del chasis inferior, se realizó el diseño del chasis superior, el cual es la estructura encargada de soportar a la PAU. Adicionalmente, en este chasis se coloca la celda de carga para la medición del paro y el sensor de velocidad angular. La fijación de la PAU se realiza mediante las chumaceras previamente seleccionadas. Para este elemento también se realizaron distintas iteraciones, la primera iteración se puede ver la figura 3.

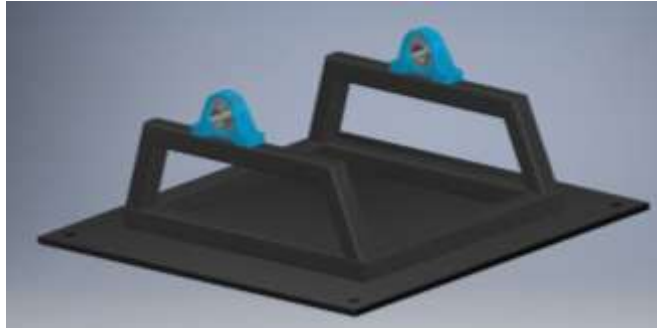


Figura 3: Imagen de la primera iteración.

Esta primera iteración, al igual que en el caso del chasis inferior, se enfocó en la facilidad de mantenimiento y la practicidad del diseño. Esta iteración se realizó con PTR con un diseño trapezoidal. El problema que presenta este diseño es la cantidad de material utilizado y al diseño ya que no se puede utilizar un material de mayores dimensiones debido a que complicaría la alineación del motor con el freno además de aumentar la altura del centro de gravedad. La gran ventaja es el bajo peso del diseño. Posteriormente, se analizaron nuevas propuestas entre las cuales se cambió la geometría a la de un cuadrado, ya que este ofrece la mayor resistencia, pero limita el cambio del brazo de palanca del freno, este brazo de palanca es el encargado de transmitir la fuerza generada por la PAU al presentar cierta resistencia al giro de motor y que pueda ser leída por la celda de carga. Por lo que se unieron estas dos iteraciones para poder obtener un diseño que tuviera la resistencia del cubo, pero la facilidad de mantenimiento y de modificación del trapecio. Se llegó al diseño que puede apreciarse en la figura 4, en el cual se utilizaron perfiles PTR cuadrado de 2.5" con un espesor de 1/8", con lo que se obtiene un chasis capaz de soportar los esfuerzos generados por la PAU actual o incluso una PAU de mayores prestaciones

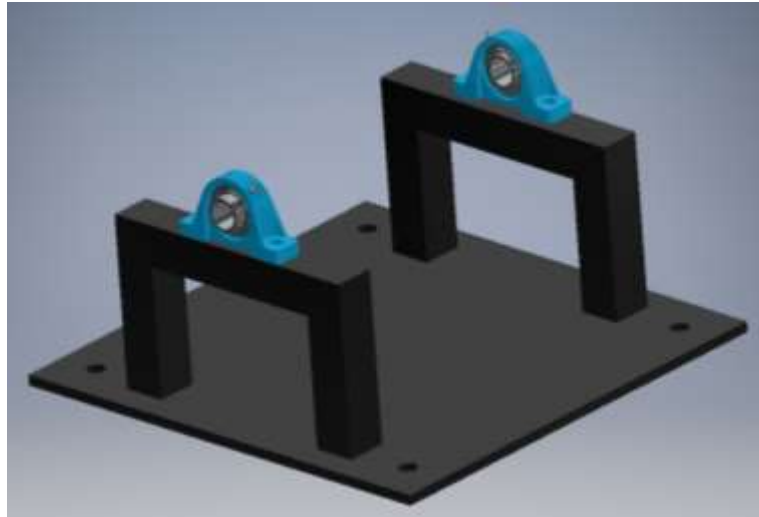


Figura 4: Imagen de la tercera iteración.

En la figura 4 se puede observar el diseño de esta cuarta iteración en la cual los elementos estructurales son robustos y capaces de soportar los esfuerzos generados por la PAU actual o incluso una PAU de mayores prestaciones. Posterior al diseño del chasis inferior y del chasis superior, se desarrolló un soporte de motor adaptable a la mayoría de los motores existentes de vehículos pesados como lo son los autobuses de pasajeros como los vehículos de carga. La única iteración que se realizó se puede ver en la figura número 2, la descripción corresponde a la letra B. Estos soportes tienen la capacidad de ajustarse en dos ejes, es decir la distancia entre los largueros y la distancia entre las torres.

La unión mecánica entre la PAU y el motor sometido a prueba se realizó por medio de una flecha cardan con la que ya se contaba, por lo que se mandó a fabricar un disco de acople para poder unir estos dos componentes.

Una vez que se terminó el diseño de cada componente, se analizaron las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del dinamómetro. Para calcular el par y para determinar la capacidad de la celda de carga necesaria es importante conocer el par máximo que soporta la PAU. Como se mencionó anteriormente, el par máximo que puede absorber el freno es de 1400 N m y, sabiendo que la longitud del brazo de palanca es de 40 cm, se determina el valor de la fuerza máxima que va a generar el motor sobre la celda mediante la ecuación 1.

$$\tau = F B \quad (1)$$

A partir de la ecuación anterior se calcula un valor máximo de 3500 N o 787 Lbf. El valor calculado no es comercial, por lo que se escogió una celda de carga tipo S de 1000 lb. Además, se

desarrollaron las fórmulas para calcular el par y la potencia que genera el motor sometido a prueba. Las ecuaciones analizadas son momento de torsión dado en kgf (ecuación 1), el momento de torsión dado en N m (ecuación 2), la potencia dada en W (ecuación 3) y la potencia dada en hp (ecuación 4).

$$\tau = F B G \quad (2)$$

$$P = \tau X \left(\frac{2\pi\omega}{60} \right) \quad (3)$$

$$P = \frac{\tau X \left(\frac{2\pi\omega}{60} \right)}{745} \quad (4)$$

En las fórmulas anteriores τ es el momento de torsión, F es la fuerza aplicada por la PAU, B es la distancia del brazo de palanca y ω es la velocidad angular. Para poder medir la velocidad se utiliza un sensor magnético junto con un disco perforado de acero, el cual tiene un total de 36 barrenos de 9 mm en su diámetro exterior teniendo un diámetro total de 184 mm.

Una vez terminado el diseño, se prosiguió con la construcción del dinamómetro, para lo cual se utilizaron procesos de manufactura tradicional. Los procesos de manufactura utilizados fueron soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, soldadura MIG, corte de material por desbaste y corte de material con sierra recíprocante.

El primer proceso fue el corte de los largueros y travesaños principales, los del soporte del chasis superior y los del soporte del motor. Adicionalmente, fue necesario cortar la placa que funciona como chasis superior. Este corte se realizó por medio de una sierra recíprocante, una cortadora de disco para acero y oxicorte con un equipo de autógena. Una vez realizados los cortes necesarios, se realizó la soldadura con arco eléctrico y electrodo revestido en los lugares que son estructurales y con soldadura MIG en los lugares que no lo son. Este proceso se puede observar en la figura 5.



Figura 5: Proceso de soldadura por arco eléctrico del chasis superior.

Posterior a la soldadura de las piezas que lo requerían, continuó el ensamblaje del dinamómetro por medio de unión temporal, es decir, unión por medio de tornillos y tuercas. Esto permite desarmar el dinamómetro para el mantenimiento del mismo, al igual que facilita su desplazamiento en caso de requerir mover el dinamómetro.

Una vez terminado el proceso de manufactura y del ensamblaje de los tres componentes del dinamómetro, se colocó la PAU, el motor y los componentes de la instrumentación. Para ello, se utilizaron dos grúas, una para levantar el motor y acomodarlo sobre su soporte, la otra para elevar y acomodar la PAU en el chasis superior.

Una vez montados los componentes antes mencionados, se montó la flecha que une el freno con el motor sometido a prueba. Para lo anterior, se utilizó una grúa tipo pluma, para soportar el peso de la misma y permitir el atornillado de la flecha. Una vez montada la flecha se alineó la PAU y el motor en los dos ejes para ajustar la altura y la distancia horizontal entre los centros de rotación. Esta alineación se realizó con un flexómetro para aproximar las distancias con ayuda de mediciones entre el centro de rotación y una referencia lateral del chasis inferior. Una vez alineado el dinamómetro se barrenó el piso para poder sujetar la guarda de protección, la cual sirve como medida de protección de a los operadores y del mismo dinamómetro en caso de que la flecha se desatornille o falle. La guarda de seguridad se ancló al piso con taquetes de expansión de 3/4 de pulgada. La guarda debe de ser de un material resistente, en este caso se fabricó con una placa de acero de 1/4" de espesor.

4. Resultados y discusión

Una vez realizado todos los procesos de manufactura y de ensamblaje se realizó una prueba del dinamómetro instrumentado para verificar su funcionamiento, la cual fue exitosa. Por lo que como resultado de todo el proceso anterior se obtuvo un banco dinamométrico para motores de hasta 500 hp funcional cumpliendo los requisitos solicitados por el laboratorio.

El banco dinamométrico para motores de hasta 500 hp se puede observar en la figura 6, donde se aprecian todos los elementos antes mencionados, al igual que el dinamómetro ensamblado.



Figura 6: Imagen del dinamómetro terminado.

5. Conclusiones

Después de realizar distintas pruebas con este dinamómetro se identificaron oportunidades para mejorar el diseño, entre ellas el método de ensamble del chasis superior, ya que para poder reemplazar alguna tuerca es necesario desmontar y desalinear dicho chasis, al igual que dos de los tres travesaños. Adicionalmente, se observó que el ensamble del travesaño intermedio es complicado, ya que no se cuenta con un método de entrada directa y hay que introducir los métodos de anclaje desde la parte trasera.

Por último, se observó que la falta de elementos anti vibraciones amplifica la vibración del motor a lo largo del dinamómetro, lo cual vuelve necesario un mantenimiento continuo debido a que las fijaciones temporales pueden perder el torque antes dado.

En el presente trabajo se realizó un proceso de diseño iterativo que permitió llegar a un producto final funcional para el laboratorio, al igual que se realizó un proceso de manufactura adecuando en el que se siguieron practicas correctas descritas en la literatura como fundamentos de manufactura moderna ^[4] además de contar la supervisión

de los técnicos y académicos del laboratorio, con experiencia en el diseño y construcción de máquinas y herramientas.

5.1. Agradecimientos

Agradecemos el apoyo que nos brindó la DGAPA a través del Proyecto PAPIIT IG 100 222 “Modificaciones estimadas del parque vehicular en la Ciudad de México hacia las décadas 30's y 40's, así como su impacto en las emisiones de contaminantes atmosféricos criterio y gases de efecto de invernadero” y al proyecto GII, “Intensificación de los procesos para la obtención de biocompuestos a partir de agua residual”.

6. Bibliografía

1. Telma (2000). Technical Specifications AC 61-25 retarder Model CE 36.
2. Ficha técnica del soporte de pie para rodamientos de inserción SY 509 M SKF.
<https://www.skf.com/ar/products/mounted-bearings/ball-bearing-units/pillow-block-ball-bearing-units/productid-SY%20509%20M>
3. Ficha técnica del rodamiento de inserción UC210 <https://es.rs-online.com/web/p/rodamientos-de-insercion/1741111>
4. Groover, M. P. (2007). Fundamentos de manufactura moderna, materiales procesos y sistemas. (3era ed.). Mc Graw-Hill

Análisis por elemento finito de un banco dinamométrico para motores de hasta 500 hp.

Vazquez, J.R.,¹ Farfan, I.A,¹ Gonzalez, F,¹ Oropeza,R,¹, Esquivel,C.R,² Rincon, P,¹ Vicente, W,²

¹ UNICE, Facultad de Ingeniería, UNAM.

² UNICE, Instituto de Ingeniería, UNAM

jricardovdd@gmail.com, ahdinalp@hotmail.com, frangopi@hotmail.com, rog1950@unam.mx ,
rcesquivelh@gmail.com, pirg@unam.mx, WVicenteR@iingen.unam.mx

1. Resumen

Se realizó un análisis por elemento finito para simular las condiciones de trabajo de un banco dinamométrico para MCIA, diseñado y construido para el laboratorio de Motores y Vehículos de la Unidad de Investigación y Control de Emisiones (UNICE). Así mismo se presentan los resultados de deformaciones y esfuerzos máximos junto con su ubicación, para corroborar que el diseño cumple con los requerimientos de seguridad para su uso.

2. Introducción

La Unidad de Investigación y Control de Emisiones (UNICE) es una unidad multidisciplinaria, de la Facultad de Ingeniería, que, junto con el Instituto de Ingeniería y el Centro de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, investigan nuevas tecnologías sobre los MCIA como el uso de combustibles alternos, dispositivos anticontaminantes y protocolos de prueba, entre otros. Para ello cuenta con diferentes equipos, entre el que se encuentra un dinamómetro de banco de 300 hp. Este dinamómetro permite caracterizar motores, es decir, obtener sus curvas características de consumo de combustible, potencia y par. No obstante, para poder analizar motores de mayor potencia y tamaño se diseñó y construyó un segundo dinamómetro, con una capacidad de hasta 500 hp.

El dinamómetro propuesto está conformado por dos partes: el chasis inferior, que es la estructura sobre la que va montado el motor y el chasis superior, en el que está instalada la unidad de absorción de potencia (PAU) y tiene la función de ser su soporte. Este tipo de arreglo permite la alineación entre la PAU y el motor de una manera práctica. Ambas partes están sujetas a el peso de los componentes y al par. Si bien el sistema está sujeto a vibraciones, no fueron consideradas en el alcance del presente trabajo.

El objetivo del presente artículo es que el diseño propuesto es capaz de soportar las condiciones de operación de motores de alto par previo a su manufactura. Para ello se realizó un análisis por elemento finito, una técnica de análisis numérico para resolver problemas que son expresados en ecuaciones en derivadas parciales donde uno de los métodos más comunes para resolver estas ecuaciones es el método de Galerkin^[1].

3. Condiciones experimentales

El modelo 3D del dinamómetro propuesto, fue hecho con el software comercial Inventor 2020®, mientras que para el análisis por elemento finito se usó el pre y pos procesador PrePoMax 2.1.0, de uso libre, para el solver, también de uso libre, CalculiX CrunchiX. El modelo se dividió en largueros, travesaños y ángulos, bajo parámetros de mallado adecuados para evitar tener un tiempo de cómputo excesivo y además contar con una buena resolución.

El dinamómetro en su totalidad fue fabricado con acero ASTM A36, cuyas propiedades se presentan en la tabla 1. El par máximo al que puede someterse el dinamómetro y el peso que debe soportar fueron obtenidos de las especificaciones del freno marca Telma modelo AC61-25 retarder^[2] y del motor Mercedes Benz modelo OM 366 LA^[3]. El análisis se hizo en dos partes. La primera con el chasis superior y fijación de la PAU considerando un peso de 2000 N y momento de torsión de frenado con valores de 1250 N m. El momento se ubicó en el centro de los barrenos de las chumaceras de la PAU de cada soporte, mientras que el peso del freno es una fuerza remota dirigida al centro del chasis superior, como se muestra en la figura 1. El momento del freno es color cian, el peso de color blanco y las condiciones de frontera de color verde.

Tabla 1. Propiedades del acero ASTM A36^[4]

Módulo de Young en MPa	200000
Limite elástico a compresión en MPa	152
Resistencia a tracción en MPa	250
Coeficiente de Poisson	0.26

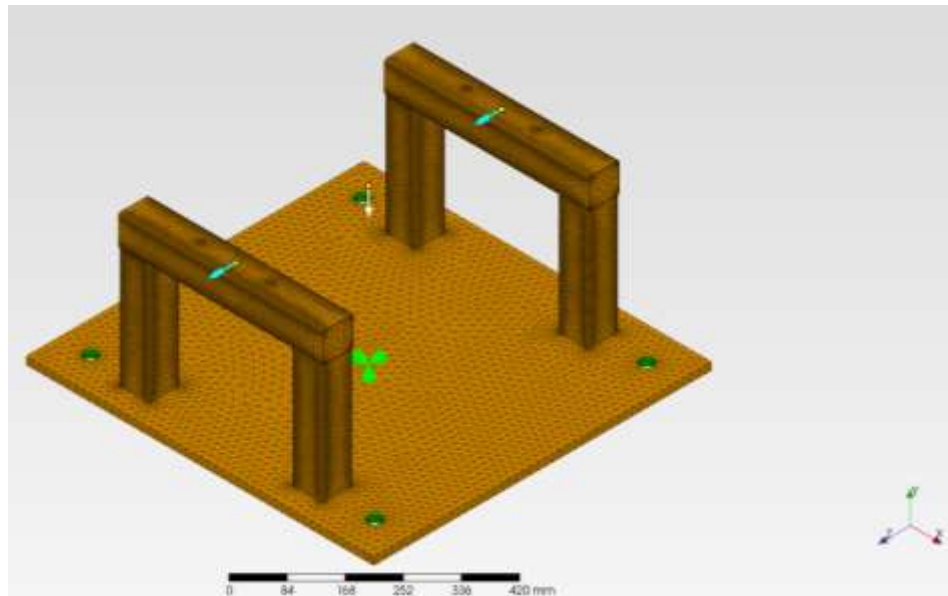


Figura 1. Ubicación de las cargas para el chasis superior y fijación de la PAU.

Para la segunda parte se consideró el chasis inferior con un peso de 5052 N y un momento de torsión de 402 Nm. El momento se aplicó entre los largueros, a la mitad de su longitud, como se en el lado derecho en la figura 2. la fuerza se ilustra con un vector de color rojo y el momento con un vector color cian. Mientras que del lado izquierdo se ve el peso y el momento del freno, con valores de 2500 pues se considera el peso del chasis superior y la fijación de la PAU.

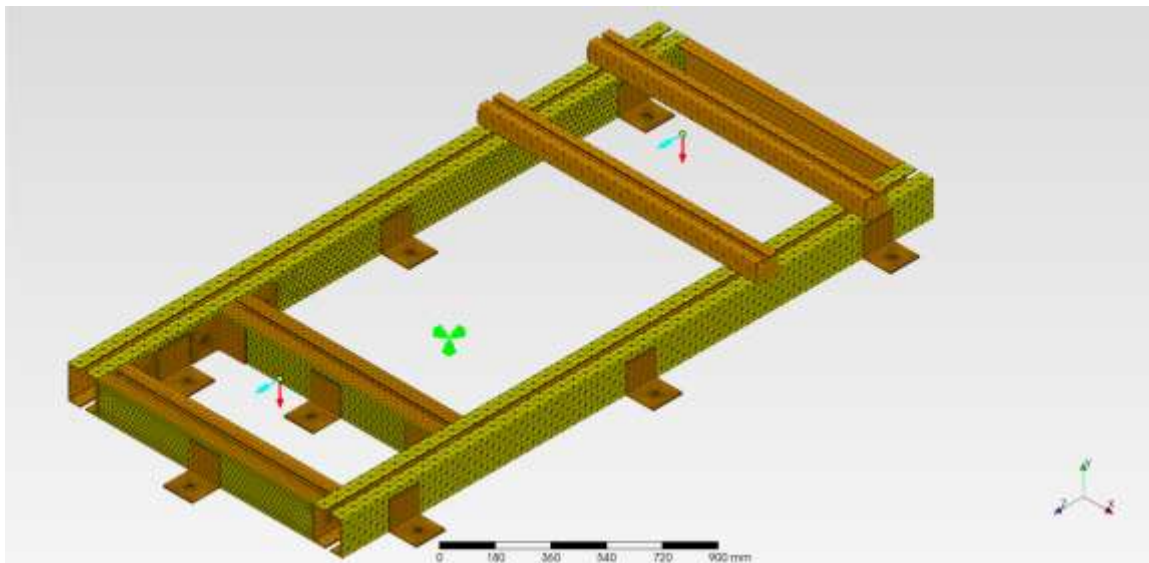


Figura 2 Ubicación de las cargas para el chasis inferior.

Como condiciones de frontera se consideraron fijos todos los barrenos de los ángulos en los largueros y travesaños, pues estos van anclados al suelo. Como restricciones se fijaron, los ángulos a los largueros y travesaños correspondientes, Figura 3.

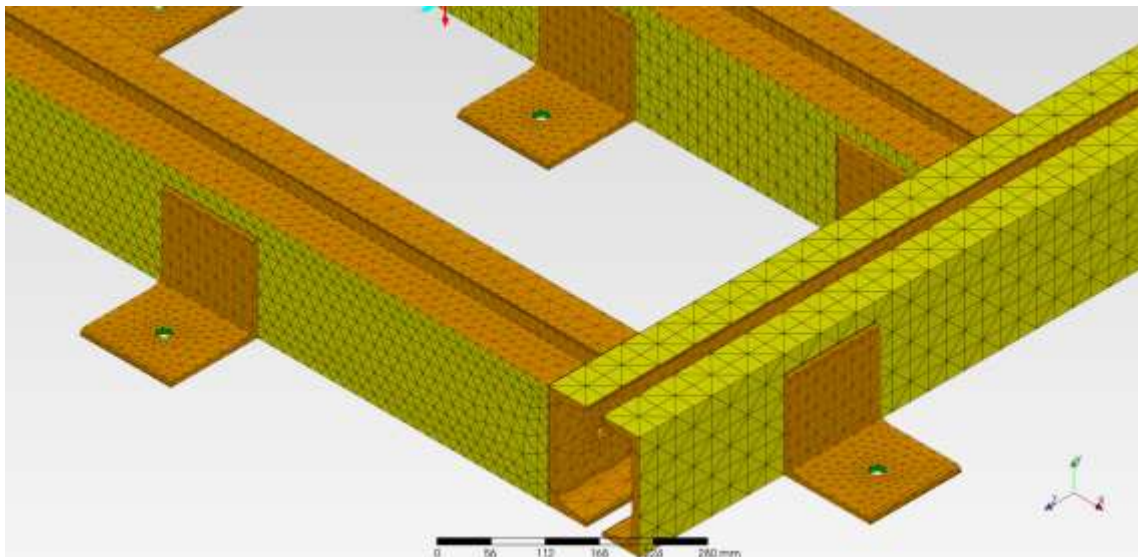


Figura 3. Ubicación de las condiciones de frontera y restricciones del chasis inferior.

4. Resultados y discusión

En la figura 4 se puede ver que los desplazamientos causados por las cargas se distribuyen de manera similar en ambos soportes y solamente se encuentran en gran medida en esta parte (indicadas en colores cálidos) pues es donde se encuentran las chumaceras que soportan al freno. La deformación va disminuyendo, y por tanto su color se vuelve más frío, a medida que se acerca más a la placa y es prácticamente nula cerca de los barrenos que fijan ambos chasis.

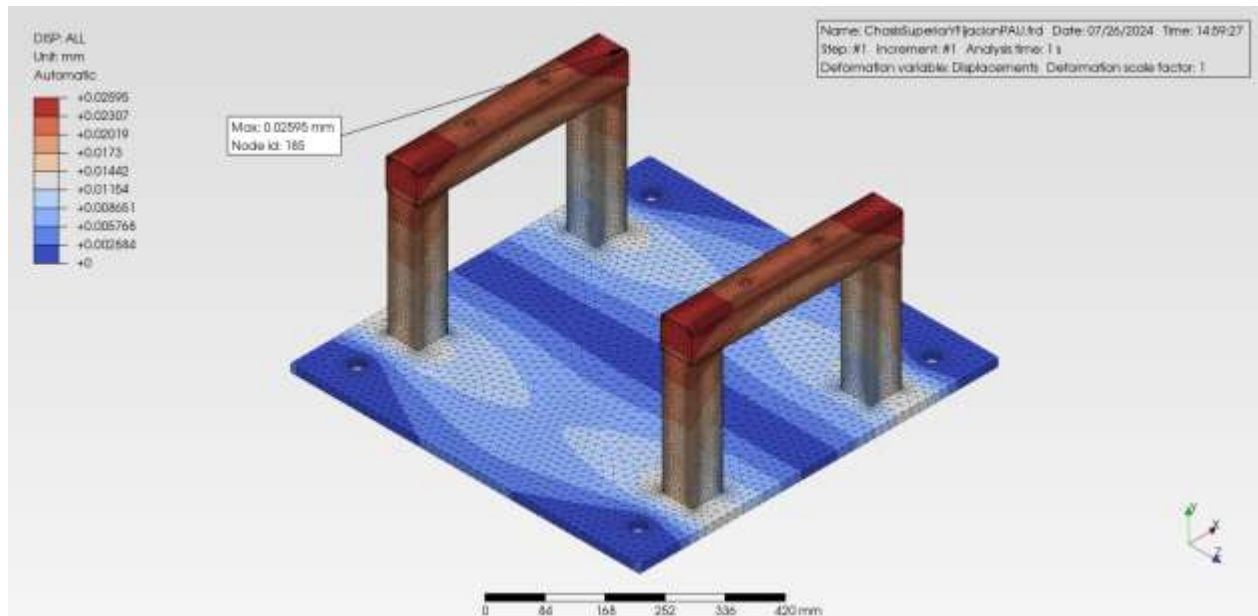


Figura 4. Desplazamientos en el chasis superior y fijación de la PAU.

Por otro lado, los esfuerzos de von Mises se hallan concentrados en los cambios de geometría, donde el mayor esfuerzo se encuentra en el lado de las patas de los soportes cercanos a los barrenos (figura 5). Resultado que no tienen un valor lo suficientemente alto como para que esta zona se pueda considerar propensa a fallar, ya que el valor obtenido es de 39.55 MPa y la resistencia a tracción del material es de 250 MPa.

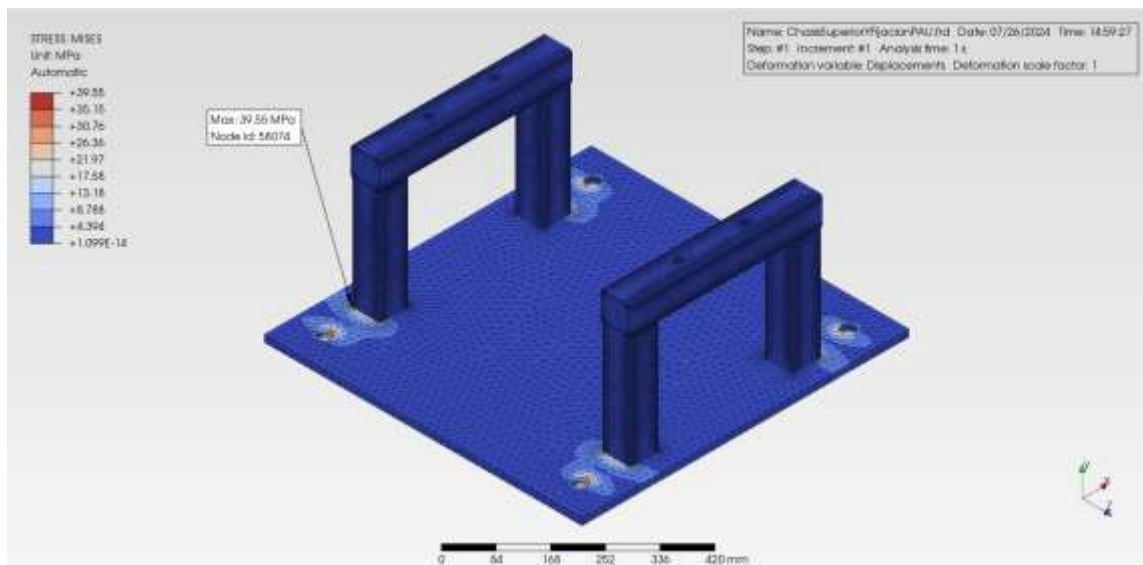


Figura 5. Esfuerzos de von Mises en el chasis superior y fijación de la PAU.

Los resultados obtenidos del chasis inferior muestran una deformación máxima de 0.01514 mm. Un esfuerzo máximo de 34.34 MPa, que a comparación de la resistencia a la tracción (250 MPa) y a la compresión (152 MPa) del material. Los mayores desplazamientos o deformaciones ocurren en la zona en la que se encuentra el motor, es decir, en los largueros, coloreados con colores naranja y rojo, deformación que va disminuyendo, representado por cambio a colores más fríos. Resultado que es de esperarse pues el peso del motor es mucho mayor al del chasis superior (figura 6).

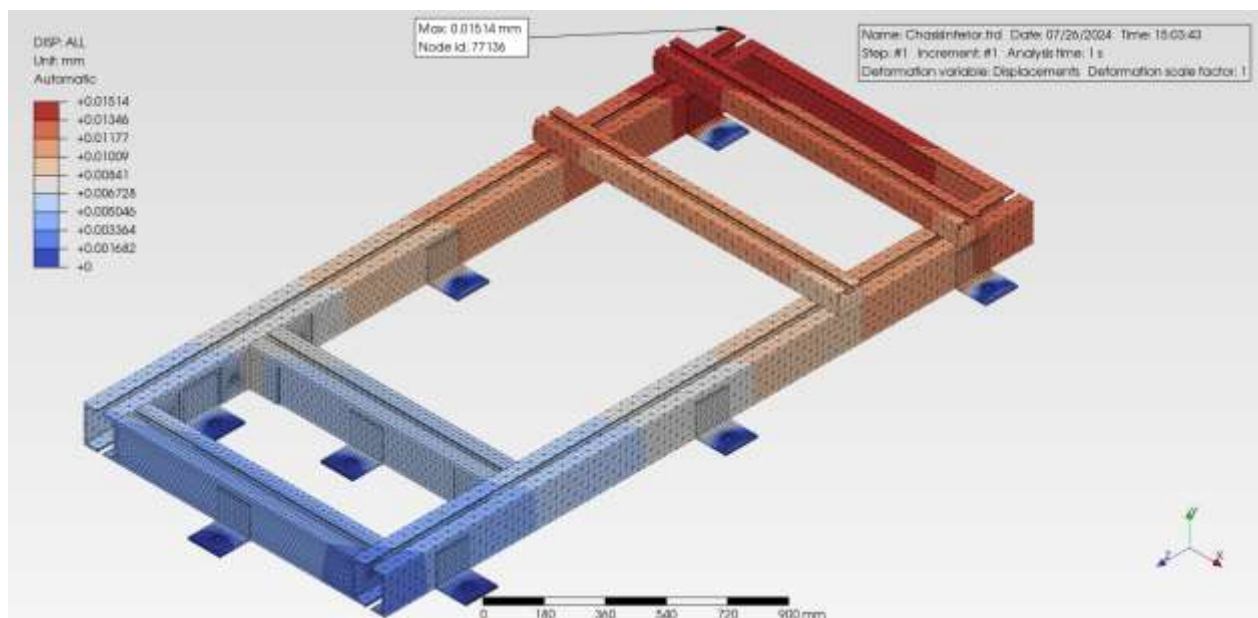


Figura 6. Desplazamientos en el chasis inferior.

Los esfuerzos, se concentran en los ángulos que fijan el chasis al suelo, con un valor máximo de 34.34 MPa como se ve en la figura 7. Es de esperarse que esta zona sea donde se concentre la mayor carga equivalente. Sin embargo, es importante mencionar que la distribución de los esfuerzos podría ser más realista si se considerara el peso y par de torsión colocados en una superficie equivalente a la de la unión de las torres de nivelación sobre las que está el motor, como se ven la figura 8.

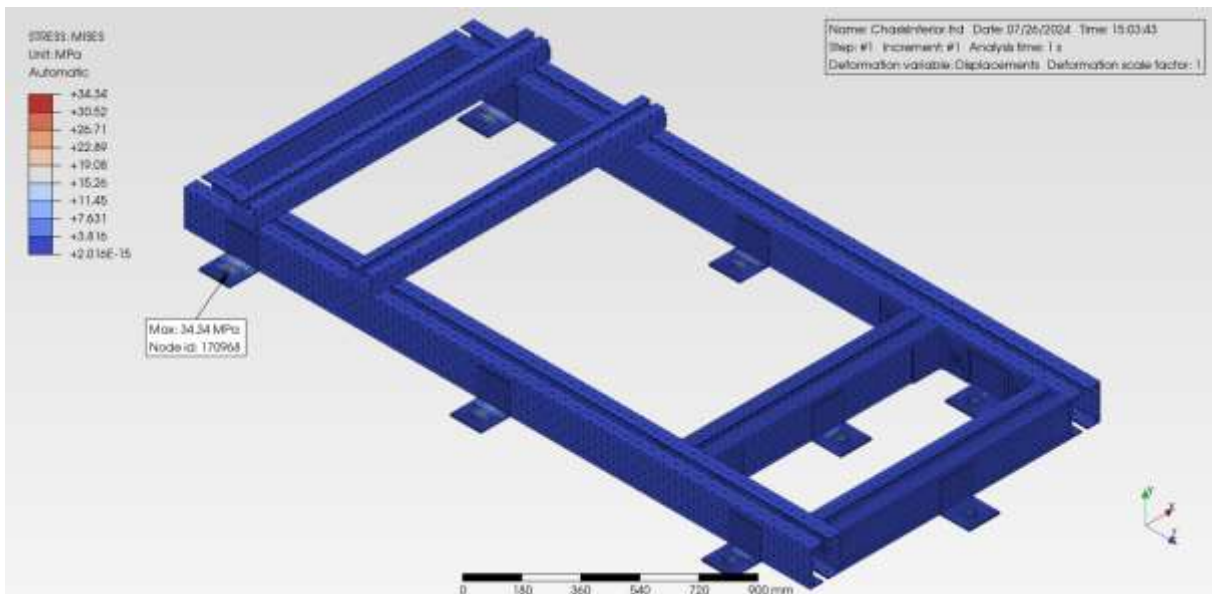


Figura 7. Esfuerzos de Von Mises en el chasis inferior.



Figura 8. Dinamómetro de banco para motores de hasta 500 hp. El rectángulo rojo representa la superficie de unión de las torres de nivelación y los largueros.

5. Conclusiones

En este trabajo se hizo un análisis por elemento finito a un dinamómetro de banco para motores de hasta 500 hp bajo condiciones de operación máxima para corroborar que el diseño es seguro para su uso. Se obteniendo resultados muy positivos pues las deformaciones que se presentaron fueron 0.02595 mm y 0.01514 mm para el chasis superior e inferior, respectivamente. Deformaciones que pueden ser consideradas como despreciables dada su magnitud tan pequeña. Un resultado parecido se ve con los esfuerzos pues el material usado tiene el valor máximo de resistencia a tracción de 250 MPa, el chasis superior tuvo un valor máximo de 39.55 MPa y el chasis inferior uno de 34.34 MPa. Resultados que también se encuentran por debajo del límite a compresión del material de 152 MPa. Los resultados aquí obtenidos indican que el diseño del dinamómetro es lo bastante robusto para las prestaciones del motor y freno que tiene actualmente, lo que valida su seguridad para los ensayos que frecuentemente se realizan en el laboratorio donde el motor se opera por debajo de las condiciones máximas. Un análisis posterior puede complementarse incluyendo el efecto de las vibraciones o incluso un análisis dinámico para conocer el comportamiento del dinamómetro.

5.1. Agradecimientos

Agradecemos el apoyo que nos brindó la DGAPA a través del Proyecto PAPIIT IG 100 222 “Modificaciones estimadas del parque vehicular en la Ciudad de México hacia las décadas 30's y 40's, así como su impacto en las emisiones de contaminantes atmosféricos criterio y gases de efecto de invernadero” y al proyecto GII “Intensificación de los procesos para la obtención de biocompuestos a partir de agua residual” para la realización de este artículo.

6. Bibliografía

1. Nikishkov, G. P. (n.d.). INTRODUCTION TO THE FINITE ELEMENT METHOD.
2. Telma. (2012). Spare Parts Catalog AC-Series Axial Retarder Insulated Ground Return. www.TelmaUSA.com
3. el Guardiola. (n.d.). Engine Mercedes OM366LA. Retrieved November 30, 2023, from <https://mymotorlist.com/engines/mercedes/om366la/>
4. MAtWeb. (n.d.). ASTM A36 steel. Retrieved July 25, 2024, from <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3a&ckck=1>

Estudio comparativo de la dureza del acero A36 antes y después de un envejecimiento acelerado por corrosión

Miguel-Ruiz, C. E.¹, Urriolagoitia-Sosa, G.¹, Martínez-Reyes, J.¹, Manuel-Jose, R.¹, García-García, R.¹, Gonzales-Navarrete, A. C.¹, Urriolagoitia-Calderón, G. M.¹

¹Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Unidad Profesional Adolfo López Mateos

cmiguelr1800@alumno.ipn.mx, guiurri@hotmail.com, jmartinezz0617@ipn.mx,
rmanuelj1800@alumno.ipn.mx, rgarciag1801@alumno.ipn.mx,
agonzalez1400@alumno.ipn.mx, urrio332@hotmail.com

1. Resumen

En este trabajo se determinó cómo la corrosión afecta en la dureza del acero A36, un material comúnmente utilizado en construcción y manufactura, mediante la escala Rockwell B (HRB), que es adecuada para medir la dureza de este tipo de metales, comparando muestras sin corrosión y con corrosión. Para ello se utilizaron tres muestras de acero A36, donde una de ellas no presentaba corrosión, y las otras dos muestras se sometieron a condiciones corrosivas para simular entornos adversos en una máquina de envejecimiento acelerado para metales durante 150 horas y 300 horas respectivamente, la cual, de forma general, consiste en exponer la probeta que se plantea analizar en condiciones controladas de temperatura, humedad y exposición a luz UV. Los resultados mostraron que la corrosión reduce en cierto grado la dureza del acero, esto dependiendo de la cantidad de tiempo que se encuentran expuestos dentro de la máquina de envejecimiento acelerado.

2. Introducción

La corrosión es un proceso de deterioro de los materiales metálicos que ocurre a través de reacciones químicas y electroquímicas, debido a la tendencia de estos materiales a alcanzar un estado de menor energía potencial. Este fenómeno puede manifestarse en una amplia gama de entornos, desde ambientes industriales con altos niveles de corrosividad hasta escenarios con condiciones atmosféricas menos agresivas ^[1 y 2]. Con frecuencia se categoriza la corrosión de los metales en distintos tipos, algunos de ellos son la corrosión uniforme, intergranular, por picaduras, galvánica, por aireación diferencial, por erosión y corrosión bajo tensiones. Los efectos de la corrosión no se limitan

solo a la apariencia y funcionalidad de los materiales, también suelen tener grandes alcances en temas económicos y ambientales ^[3 y 4]. Desde la perspectiva económica, los costos derivados de la corrosión son significativos, ya que la necesidad de reparación o sustitución de componentes o elementos dañados implica una dificultad económica considerable para los propietarios de infraestructuras. Estos costos incluyen no solo el gasto en materiales y mano de obra, sino también el tiempo de inactividad asociado con la reparación o el reemplazo, lo que puede resultar en pérdidas de producción y, en casos extremos, en la paralización completa de operaciones. Además, la corrosión puede provocar fallos inesperados en equipos y estructuras, lo que puede dar lugar a accidentes graves, aumentando aún más los costos en términos de seguridad y salud ^[5].

Desde un punto de vista ambiental, la corrosión tiene implicaciones alarmantes, ya que los productos resultantes de la corrosión pueden liberar sustancias contaminantes al aire, al agua y al suelo, afectando negativamente los ecosistemas. Este impacto se ve intensificado por la necesidad de producir materiales de reemplazo, lo que puede aumentar las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera y otros contaminantes debido a los procesos de fabricación. En resumen, la corrosión es un fenómeno complejo que tiene repercusiones en la durabilidad y la integridad de los materiales, así como en importantes pérdidas económicas y daños ambientales.



Figura 1. Problemas ocasionados por la corrosión

2.1 Envejecimiento acelerado

La corrosión hace referencia a la pérdida de cierta cantidad de masa de un material en un determinado lapso de tiempo, lo que implica un deterioro destructivo de sus propiedades mecánicas. Esta degradación ocurre debido a diversas reacciones químicas entre el material, su recubrimiento y

el medio en el que se encuentra. Para evaluar el envejecimiento de los materiales, se han desarrollado diferentes pruebas que permiten determinar cómo responden y cómo se ven afectadas sus propiedades. Uno de los ensayos más comunes es el que se lleva a cabo con niebla salina, el cual, originalmente se realizaba con agua de mar pulverizada y ha demostrado ser muy efectiva [6].

La prueba del envejecimiento acelerado proporciona un entorno corrosivo controlado el cual es utilizado para generar información relativa a la resistencia a la corrosión de muestras de metales y aceros, las pruebas de envejecimiento acelerado pueden ofrecer un indicio de cómo se comportará el material bajo determinadas condiciones. Por esta razón, los aceros a menudo se caracterizan mediante la realización de pruebas de corrosión acelerada, siendo varias veces más rápido el fenómeno de corrosión que en tiempo real. El medio se selecciona para que no esté demasiado alejado de las condiciones reales, pero un poco más severo, para simular la duración de la vida [7].

3. Condiciones experimentales

Gran parte de los componentes estructurales y de máquinas parece no ser inmune a este fenómeno, por lo que el metal en estudio es el acero estructural A-36, ampliamente utilizado en construcción. Este acero se usa en perfiles y láminas para edificios e instalaciones industriales, asimismo se encuentra en los cables para puentes colgantes y atirantados, y en la preparación de concreto reforzado, se emplea en varillas o mallas electrosoldadas para fortalecer el concreto [8]. Las propiedades mecánicas del acero son las siguientes:

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero A36 [9]

Propiedades	Valor
Densidad	7.85 g/cm ³
Resistencia a la tensión	400-552 MPa
Límite de cedencia	250 MPa
Módulo de Young	200,000 MPa
Coeficiente de Poisson	0.26
Elongación %	18%
Dureza Rockwell B	70-83

3.1 Secuencia de operación

El envejecimiento acelerado al cual se sometieron las probetas de acero se aplicó en periodos de 12 horas continuas, en donde los porcentajes de humedad dentro de la cámara era de 25% a 45%, así como un rango de temperatura de entre 35 °C a 45 °C. cabe mencionar que el ambiente húmedo contenía 3% de cloruro de sodio (NaCl). Por último, la aplicación de luz UV, se mantendrá constante durante las 12 horas de aplicación de la prueba. Para este trabajo se llevaron a cabo tres conjuntos de probetas, de los cuales, el primero consiste en el material sin envejecimiento. La segunda prueba se realizó con un total de 150 horas y la tercera se le aplicó un total de 300 horas dentro de la cámara de envejecimiento.



Figura 2. Aplicación del envejecimiento acelerado

4. Resultados y discusión

El ensayo de dureza se realizó en el durómetro de marca Mitutoyo HR-320MS, mediante la escala Rockwell B (HRB), con un indentador de 1/16" de carburo de tungsteno, aplicando una carga de 100 kg. Se tomaron cinco lecturas a cada una de las probetas que aún tenían los residuos de los óxidos en la superficie, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 2. Resultados del ensayo de dureza Rockwell B

HRB	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio
Sin envejecimiento	73.5	73.8	72.7	74.5	73.5	73.6
Envejecimiento 150 horas	65.7	27.8	54.1	33.5	64.3	49.1
Envejecimiento 300 horas	61.6	54.4	65.7	61.7	63.7	61.4

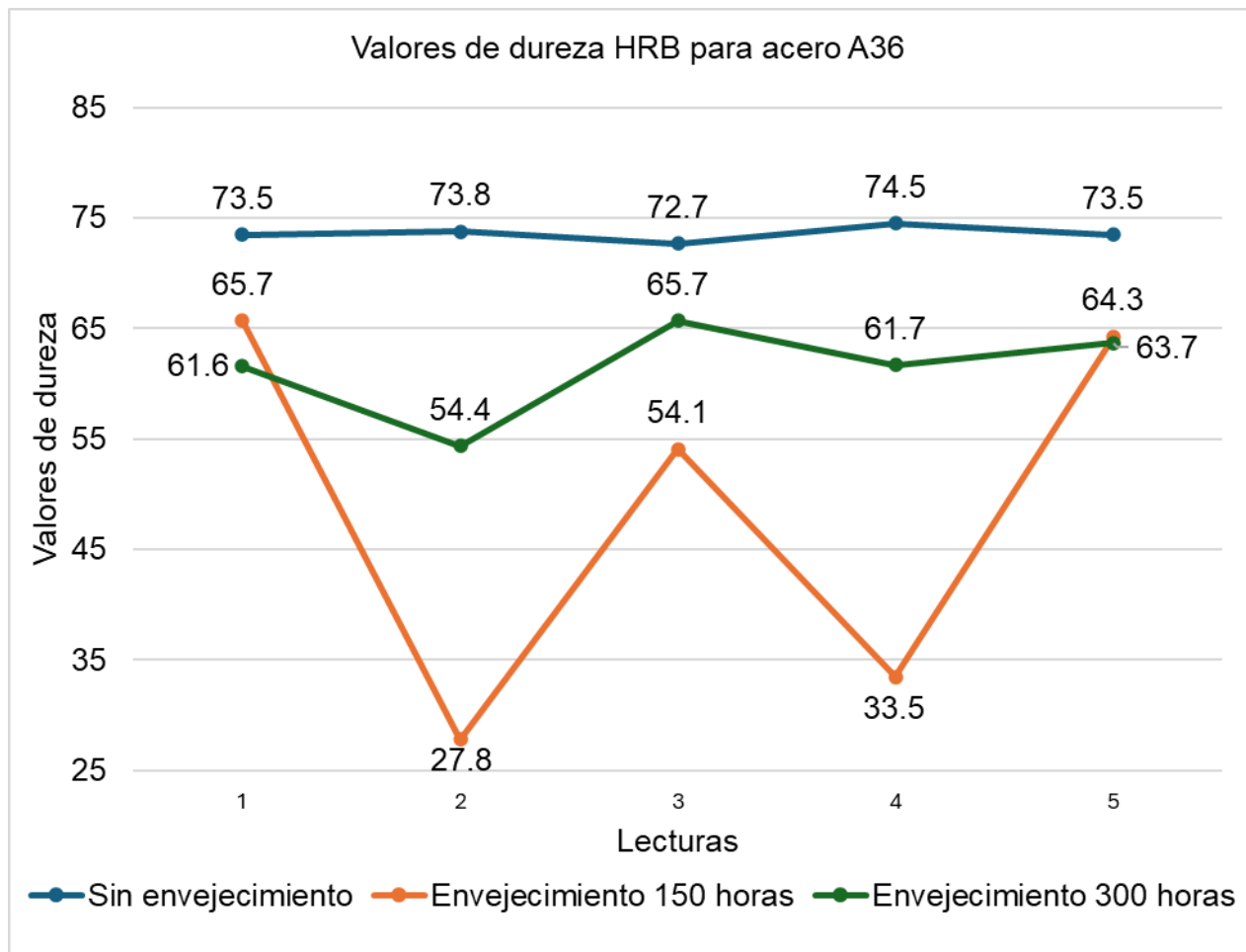


Figura 3. Gráfica de los resultados del ensayo de dureza Rockwell B con los residuos de óxidos en la superficie

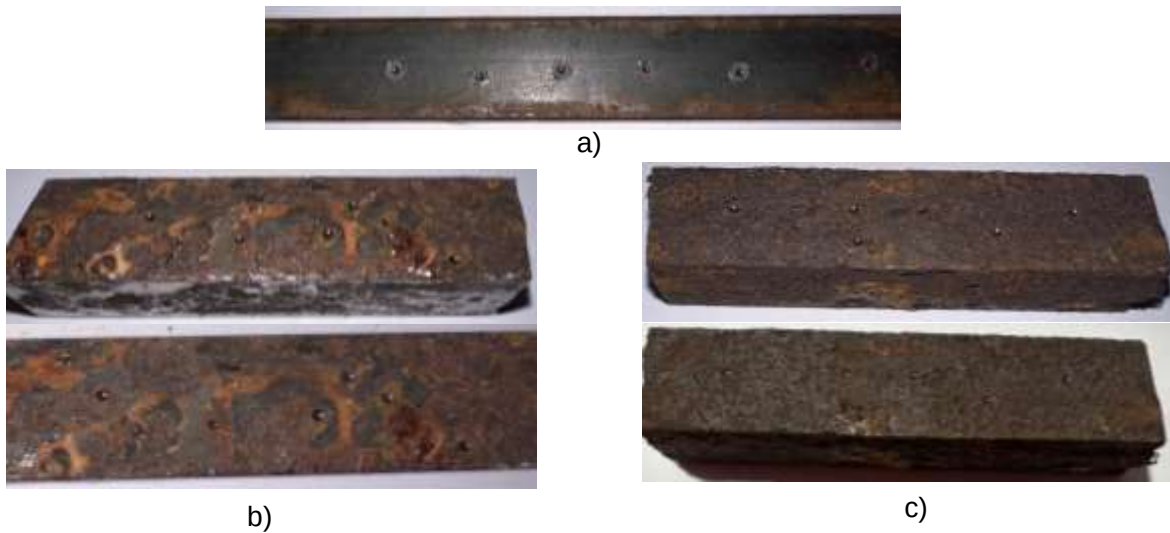


Figura 4. Muestras del ensayo de dureza a las probetas con residuos de óxidos en la superficie a) sin envejecimiento, b) 150 horas de envejecimiento y c) 300 horas de envejecimiento

Los resultados obtenidos en la Tabla 2 muestran un gran rango entre resultados, así que se procedió a retirar los residuos de óxidos de la superficie mediante un lijado y, posteriormente, se volvió a realizar las mediciones de dureza en las probetas.

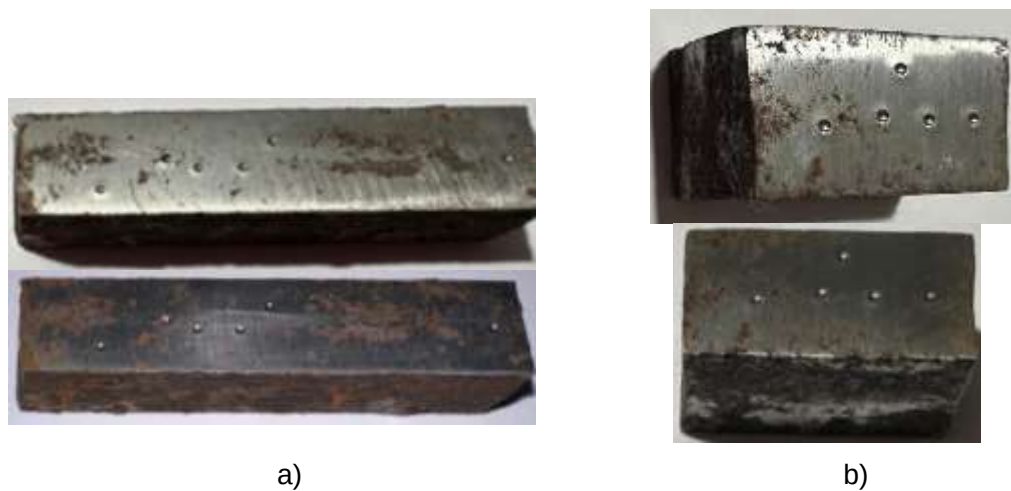


Figura 5. Muestras del ensayo de dureza a las probetas después de lijar la superficie a) 150 horas de envejecimiento y b) 300 horas de envejecimiento

Tabla 3. Resultados del ensayo de dureza Rockwell B con la superficie lijada

HRB	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Promedio
Envejecimiento 150 horas	72	72.2	71	71.6	71.2	71.6
Envejecimiento 300 horas	66.5	67.3	67.9	68.1	68.1	67.6

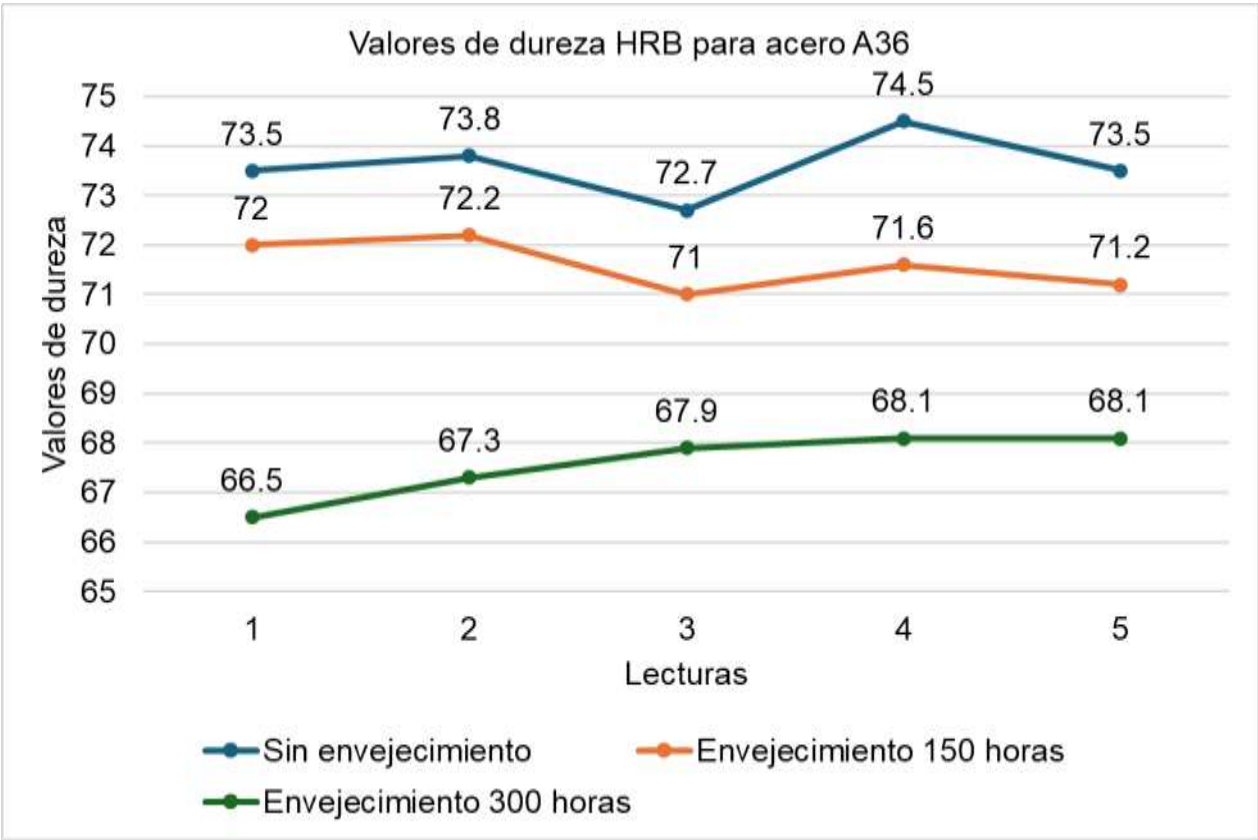


Figura 5. Gráfica de los resultados del ensayo de dureza Rockwell B con la superficie lijada

5. Conclusiones

La degradación de la dureza superficial causada por la corrosión es un mecanismo dominante potenciado por la erosión. Una gran reducción de la dureza superficial da como resultado una alta tasa de erosión en lodos corrosivos. Los valores de dureza obtenidos en las dos diferentes etapas del envejecimiento acelerado se encuentran por debajo del valor de dureza sin corrosión, cuyo valor promedio es 73.6 HRB. Mientras que, para los resultados obtenidos de dureza con residuos de óxidos en la superficie, el valor de dureza con un envejecimiento de 150 horas es de 49.1 HRB, el cual disminuyó un 33.3%. Asimismo, con un envejecimiento de 300 horas se obtuvo una disminución en la dureza de 16.6%, con un valor promedio de 61.4 HRB. Observando estos valores, se puede determinar que la degradación del material generada por la corrosión afectó la dureza superficial del acero, sin embargo, no existe una relación proporcional entre los datos obtenidos de la Tabla 2, ya que la dureza obtenida proporciona valores sobre los óxidos que se localizaban sobre la superficie del material. Incluso, visualmente, se puede observar que las huellas generadas por el indentador presentan diferentes tamaños en el material. Es por ello por lo que se retiraron los óxidos de la superficie, obteniendo valores más aceptables. Con un envejecimiento de 150 horas, se obtuvo una disminución de 2.7%, con un valor promedio de 71.6 HRB. Por su parte, para la probeta de 300 horas, la dureza disminuyó un 8.2%, con un valor de 67.6 HRB. Con esto, se puede observar una correlación no lineal entre el tiempo dentro de la cámara de envejecimiento acelerado y la disminución de los valores de dureza.

5.1. Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al Instituto Politécnico Nacional por permitirnos formar parte de este gran instituto, así como del apoyo brindado para desarrollar y concluir este trabajo de investigación. De igual manera, se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por destinar los apoyos necesarios para la realización de este trabajo.

6. Bibliografía

1. Salazar-Jiménez, J. A., Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales, Tecnología en Marcha, Vol. 28, No. 3, pp 127-136, 2015.
2. Shaw, B. A. y Kelly, R. G., What is corrosion?, The Electrochemical Society Interface, Vo. 15, No. 1, pp 24-26, 2006.
3. William D. Callister, Jr. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, 3ª Edición, Ed. Reverté, pp 566-586, 2003.
4. Barrón-Vázquez, S., Vázquez-Huerta, G., Miranda-Hernandez, J., Ángeles-Beltrán, D., y Martínez-Brioso, L. A., Influencia de la modificación química superficial sobre la

- microestructura, dureza y resistencia a la corrosión en un acero 8620, *Miscelánea Científica en México*, Vol. 6, pp 221, 2020.
5. Pancorbo, F. J., Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación, Ed. Alfaomega, pp 7-8, 2010.
 6. Master, W. D., A History of the Salt Spray Test, Publication GMR-497, Ed. General Motors Corporation, pp 1137-1152, 1965.
 7. Appleman, B. R. y Cambell, P. G., Salt spray testing for short term evaluation of coatings; Part 1, Reactions of coating in salt spray, *Journal of Coatings Technology*, Vol. 54, No. 3, pp 17-25, 1982.
 8. Hurtado-Avella, S. A., Análisis morfológico en uniones soldadas mediante el uso de ensayos no destructivos específicos para la identificación de socavado interno y falta de penetración en juntas de tuberías de acero ASTM A36, Tesis de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás, pp 20, 2014.
 9. Chagoyen-Méndez, C. A., Acosta-García, Y., Rodríguez-Toledo, Y., Recarey-Morfa, C., Aragón-López, G. B. y Leiva-Pérez, J., Simulación numérica de los apoyos de puente metálico giratorio, *Ingeniería Mecánica*, Vol. 14, No. 3, pp 170-180, 2011.

Diseño y análisis numérico de chasis para robot terrestre de rescate

Yparrea-Arreola, R. I.¹, Urriolagoitia-Sosa, G.¹, Romero-Ángeles B.¹, Rocha-Martínez, M. N.¹, Mar-Luna, F. J.¹, López-Zumarán, I. A.¹, Urriolagoitia-Calderón, G. M.¹

¹Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

ryparreaa2200@alumno.ipn.mx, guiurri@hotmail.com, bromeroa@ipn.mx,
mrocham2201@alumno.ipn.mx, fmarl2300@alumno.ipn.mx, ilopez22300@alumno.ipn.mx,
urrio332@hotmail.com

1. Resumen

El trabajo se enfoca en el diseño y manufactura del chasis de un robot de rescate, pieza clave para la rigidez y soporte estructural del sistema. Se aborda tanto la teoría como la práctica, destacando la necesidad de una estructura robusta para entornos difíciles. Se seleccionó un chasis tipo marco por su simplicidad, resistencia y maniobrabilidad en terrenos irregulares, facilitando el acceso a espacios confinados. El acero A36 fue elegido por su alta resistencia a la tracción y facilidad de manufactura. Para las uniones se usó soldadura MIG, garantizando precisión y durabilidad. El análisis del chasis, realizado mediante el método del elemento finito en Ansys APDL, permitió evaluar su comportamiento bajo condiciones reales de rescate, asegurando que soportaría las tensiones sin comprometer su integridad. Se concluyó que el chasis tenía la resistencia adecuada para su uso en operaciones exigentes.

2. Introducción

El chasis, elemento y parte esencial en un vehículo, sirve como la estructura principal de soporte, que sostiene tanto la carrocería como el sistema motriz, entre otros. Se ensamblan en él varios componentes mecánicos, desde el motor hasta los sistemas de ruedas, suspensión, frenos y dirección. Esta estructura aporta la solidez necesaria para sostener los diversos elementos del vehículo y la carga que transporta, manteniendo la rigidez del automóvil. Para cumplir con su función, el chasis debe ser lo suficientemente fuerte como para resistir golpes, torsiones, vibraciones y otros tipos de estrés. En su diseño mecánico, la rigidez a la flexión y torsión se considera fundamental para mejorar el manejo del vehículo. En resumen, la fortaleza y rigidez son dos aspectos críticos en el diseño mecánico del chasis, ya que es la estructura principal para soportar las cargas que soporta ^[1].

Ciertos vehículos destinados a uso comercial o todoterreno pueden integrarse en cuerpos unitarios. En estas situaciones, ocasionalmente se emplean estructuras adicionales para mejorar la distribución de las cargas en el cuerpo, brindando soporte a mecanismos de suspensión, el motor o la transmisión. En estos tres escenarios, las estructuras del chasis son conocidas como marcos (frame), subcuerpos (underbody) y submarco (subframe), respectivamente. El concepto de cuerpo unitario se deriva de la idea de que la estructura del cuerpo está implementada para soportar todas las cargas del vehículo de manera directa. En contraste, en el caso de un cuerpo separado, no implica que el cuerpo sea simplemente una de las cargas externas que afectan la estructura del chasis (es decir, el marco). Un cuerpo separado juega un papel en el soporte de cargas externas. La sección inferior del vehículo (underbody) guarda una similitud funcional con el chasis de un automóvil antiguo o un vehículo industrial. A este subconjunto a veces se le llama plataforma. Aunque no puede llevar a cabo ninguna función sin el resto del cuerpo, exhibe algunas características tecnológicas y organizativas destacadas ^[2].

2.1. Características del chasis

Como se estipuló anteriormente, el chasis es básicamente el esqueleto un automóvil, la estructura interna que aporta sostén, rigidez y forma a tu coche o camioneta. Es el encargado de conectar las cuatro ruedas y el sistema de dirección y el que recibe todas las cargas y esfuerzos del auto. Sus características principales se mencionan a continuación.

2.2. Masa de los componentes del chasis

Para realizar el análisis, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones; obtener una estimación de los pesos de carga y de los elementos del chasis (como baterías, motores eléctricos, controlador, etc.) para poder evaluar las condiciones normales de operación y realizar cálculos en función de estos datos (Tabla 1).

TABLA 1. COMPONENTES CONSIDERADOS PARA EL DISEÑO

Componentes	Cantidad	Masa
Batería	1 pieza	2 210 g
Motores eléctricos	2 piezas	2 000 g
Módulo de control	1 pieza	241 g
Cámara de video	1 pieza	450 g

Los componentes considerados fueron elegidos a la facilidad para conseguirlos en el mercado local o en su defecto en línea. Además de considerar en el caso del módulo de control, una tarjeta que tenga el poder suficiente para el procesamiento de imágenes (es la característica más importante del robot).

2.4. Dimensiones del chasis

La longitud del marco será de 600 milímetros de largo, con dos motores en la parte trasera y dos motores en la parte delantera, cabe señalar que los motores se van a conectar a las ruedas traseras por medio de una transmisión de engranes de cadena en cada uno de los motores (Figura 1).

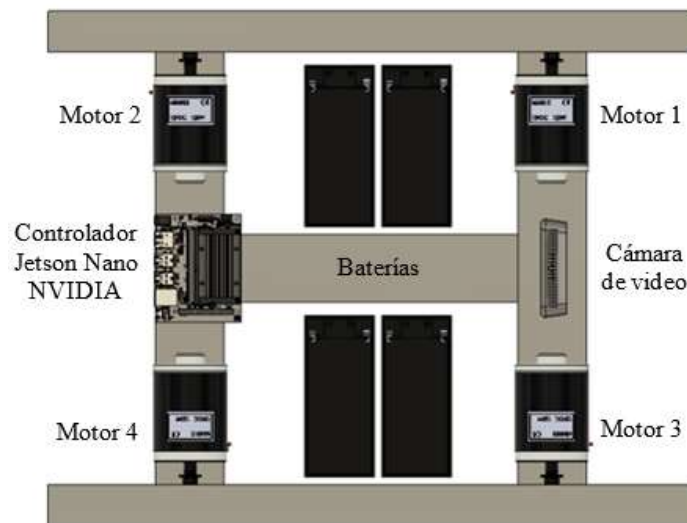


FIGURA 4. ARREGLO DE COMPONENTES CON MEDIDAS EN EL CHASIS

Los componentes que se van a montar en el chasis son los siguientes:

- Dos motores que tienen una longitud de 100 mm, 68 mm de diámetro, la longitud del eje es de 28 mm, el diámetro del eje es de 8 mm, la distancia entre los 2 agujeros fijos del motor es de 36 mm.
- La batería tiene 65 mm de largo, 150 mm de ancho y 94 mm de alto.

- Cámara de video *Sony Real Sense 4 id* que va a ir por encima de la batería, en un módulo especial que va a sobresalir por encima de la tapa que va a cubrir todo lo anterior. Además, el robot tendrá la funcionalidad de intercambiar componentes funcionales para apoyar en los trabajos de búsqueda y rescate (por ejemplo; un brazo robótico).
- El controlador se colocará en la parte trasera y tiene medidas de 100 mm de largo y 80 mm de ancho y 45 mm de alto y se muestra en la figura 2.

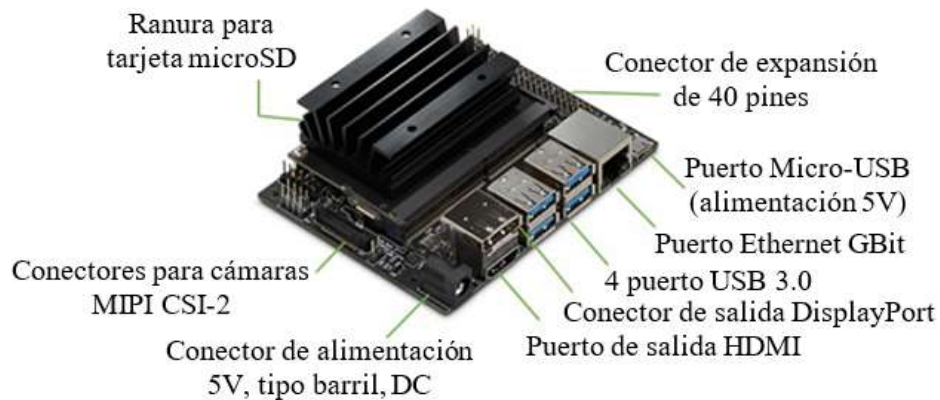


FIGURA 5. CONTROLADOR JETSON NANO NVIDIA

2.5. Aspectos a considerar en el diseño

Uno de los aspectos clave y cruciales en el proceso de diseño es asegurar un desarrollo óptimo del chasis y la estructura principal del vehículo. Para iniciar el diseño del chasis, es esencial realizar un análisis exhaustivo de las distintas situaciones de carga. Se identifican cinco situaciones básicas de carga ^[3]:

- Situación de flexión. Implica carga en el plano vertical debido al peso distribuido de los componentes a lo largo de la estructura del vehículo, causando flexión.
- Situación de torsión. Se produce al aplicar un momento en los ejes de las ruedas mediante cargas ascendentes y descendentes en cada eje. Estas cargas generan una acción torsional.
- Combinación de cargas de flexión y torsión.
- Carga lateral. Originada en el punto de contacto entre el neumático y el suelo. Estas cargas se contrarrestan con fuerzas centrífugas.
- Carga longitudinal. Se produce durante la aceleración y desaceleración del vehículo, debido a las fuerzas de inercia.

3. Condiciones experimentales

3.1. Análisis estructural estático de cargas sobre el chasis

Cuando el chasis se observa lateralmente, se puede analizar como una viga. En este enfoque bidimensional, se considerará el chasis como una viga simplemente apoyada, sobre la cual se aplican los pesos de los componentes que se colocarán encima ^[4].

En esta sección, los cálculos se llevarán a cabo teniendo en cuenta las condiciones normales de peso a las que estará expuesto el vehículo, abarcando los componentes del robot (Tabla 2). El primer paso en este análisis será una tabla para agregar los elementos que se ensamblaran en el chasis y convertir la masa en gramos a peso en Newtons:

$$\text{Peso (P)} = \text{Masa (m)} \cdot \text{Fuerza de gravedad (g)} \quad (1)$$

Para el cálculo se utilizará la constante de la fuerza de aceleración de la gravedad, que es igual a 9.81 m/s^2 .

TABLA 2. CONVERSIÓN

Componentes	Cantidad	Medidas <i>Longitud × Altura × Profundidad</i>	Masa (kg)	Peso (N)
Batería	4	65 mm x 150 mm x 940 mm	16	156.96
Motores	4	115 mm x 110 mm x 110mm	10	98.1
Módulo de control	1	100mm x 80 mm x 45 mm	5	49.05
Cámara de video	1	124 mm x 26 mm x 36 mm	4	39.24
Tramos de PTR	5	2273 mm x 38.1 mm x 63.5 mm	10	98.1
Carcaza	1		5	49.05
Brazo robótico	1		25	245.25
Total			75	735.75

El segundo paso será la realización del diagrama del chasis como viga. Los apoyos sólo tendrán fuerzas verticales. Por lo tanto; $\rightarrow + \Sigma F_x = 0$. Dibujando el diagrama de la viga para el análisis que nos va a servir como punto de inicio para el cálculo de las reacciones se tiene lo siguiente:

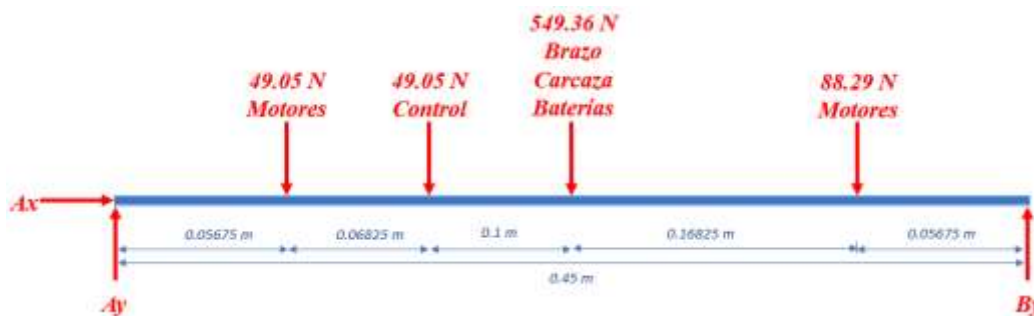


FIGURA 3. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE

Para obtener las reacciones en A y B hay que calcular la sumatoria de momentos:

$$\sum M_B = 0$$

$$\begin{aligned}
 R_A (0.45 \text{ m}) &= (49.05 \text{ N})(0.05675 \text{ m}) + (49.05 \text{ N})(0.125 \text{ m}) + (549.36 \text{ N})(0.225 \text{ m}) + (88.29 \text{ N})(0.39325 \text{ m}) \\
 R_A (0.45 \text{ m}) &= 2.78 \text{ Nm} + 6.13 \text{ Nm} + 123.61 \text{ Nm} + 34.72 \text{ Nm} = (167.24 \text{ Nm}) / (0.45 \text{ m}) \\
 R_A &= 371.64 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Para calcular:

$$\begin{aligned}
 \uparrow + \Sigma F_y &= 0 \\
 R_B &= 49.05 \text{ N} + 49.05 \text{ N} + 549.36 \text{ N} + 88.29 \text{ N} - 371.64 \text{ N} \\
 R_B &= 364.11 \text{ N}
 \end{aligned}$$

En la figura 4, se muestran el diagrama de fuerza cortante que es de 371.64 N y el momento flector de 70.45 N.

El esfuerzo normal es una fuerza perpendicular debido a las cargas axiales sobre el elemento que se está estudiando. Para su cálculo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = Mc/I \quad (2)$$

Las medidas de la viga principal son de $b = 38.1 \text{ mm}$ (0.0381 m) y $h = 63.5 \text{ mm}$ (0.0635 m). Por lo tanto, las coordenadas del centroide estarán a la mitad de cada una. Es decir, $\bar{x} = 0.019 \text{ m}$ y $\bar{y} = 0.03175 \text{ m}$.

Ahora, la fórmula para el momento de inercia se calcula primero el rectángulo completo y después se le resta lo equivalente al hueco:

$$I = ((bh^3)/12)_e - ((bh^3)/12)_i \quad (3)$$

$$I = \frac{(0.0381\text{m})(0.0635\text{m})^3}{12}$$

$$I = 8.13 \times 10^{-7} \text{ m}^4 \text{ (exterior)}$$

$$I = \frac{(0.03275\text{m})(0.05816\text{m})^3}{12}$$

$$I = 5.36 \times 10^{-7} \text{ m}^4 \text{ (interior)}$$

$$I = 8.13 \times 10^{-7} \text{ m}^4 - 5.36 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$I = 2.77 \times 10^{-7} \text{ m}^4 \text{ (total)}$$

Una vez obtenido el momento de inercia del PTR rectangular, procedemos a sustituir en la fórmula 2.

$$\sigma = \frac{\text{Momento flector} \cdot \text{Centroide}}{\text{Momento de inercia}}$$

$$\sigma = \frac{(70.45 \text{ Nm})(0.03175 \text{ m})}{2.77 \times 10^{-7} \text{ m}^4}$$

$$\sigma = 8\,075\,045.12 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma = 8 \text{ MPa}$$

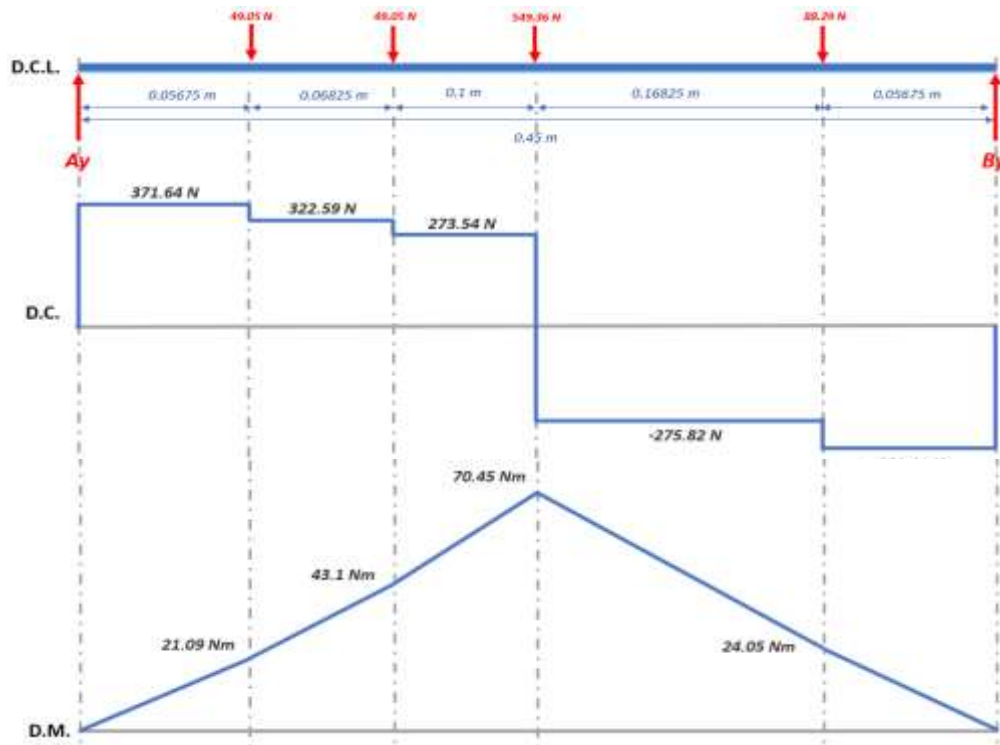


FIGURA 4. DIAGRAMAS DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR.

3.2. Análisis numérico

Para confirmar los resultados obtenidos se procede a continuación a realizar el análisis numérico con el Método del Elemento Finito se utilizó el programa Ansys APDL. En el programa computacional se define el tipo de análisis, que en este caso será estructural. Se va a utilizar un

elemento de tipo viga, con dos nodos, el grado del polinomio será cubico para que los resultados sean más precisos [5]. Se define a continuación el material que es el acero A36, se selecciona el tipo de análisis, en este caso estructural, el material se considera con comportamiento lineal, elástico, homogéneo e isotrópico. El módulo de Young = 210 000 N/mm² y la relación de Poisson será 0.3.

Ya que se especificaron todas las cargas, se realiza el análisis para poder apreciar que la mayor deformación se tendrá en el centro de la viga (Figura 5). Así como, se obtiene el diagrama de fuerza cortante, se puede observar que coincide con el análisis realizado previamente (Figura 6). A continuación, se presenta el diagrama de momento flector (Figura 7).

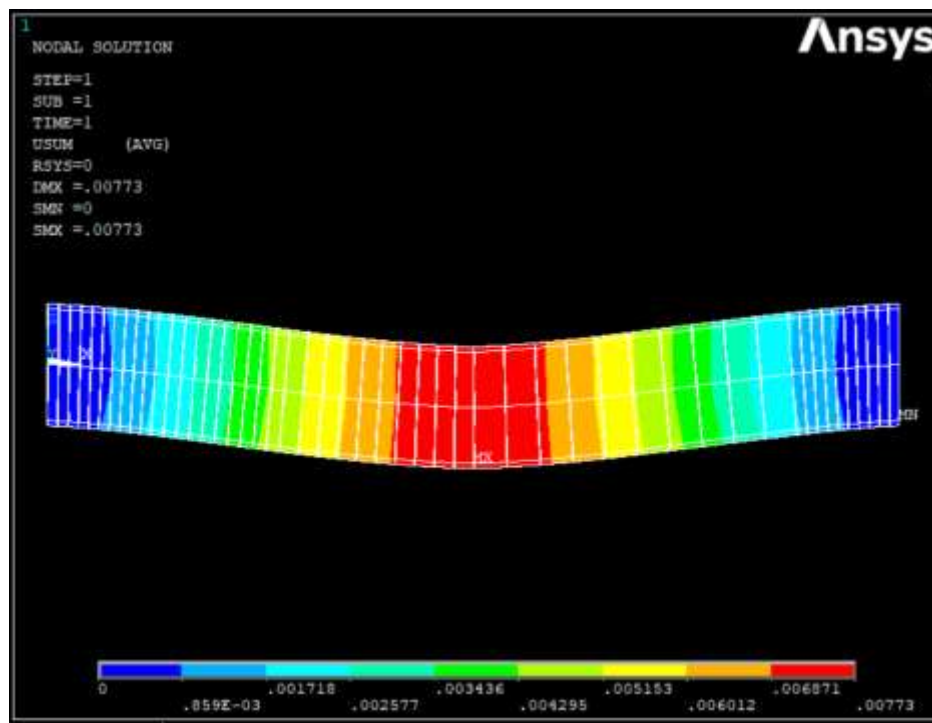


FIGURA 5. FLEXIÓN EN VIGA

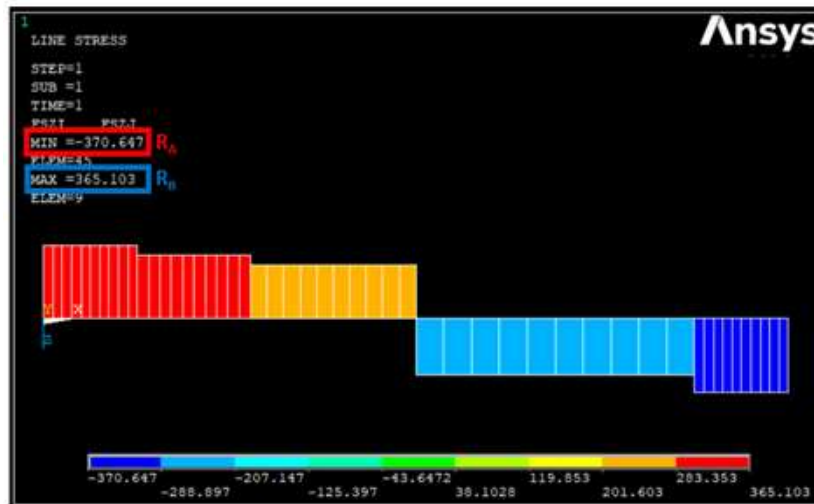


FIGURA 6. DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE

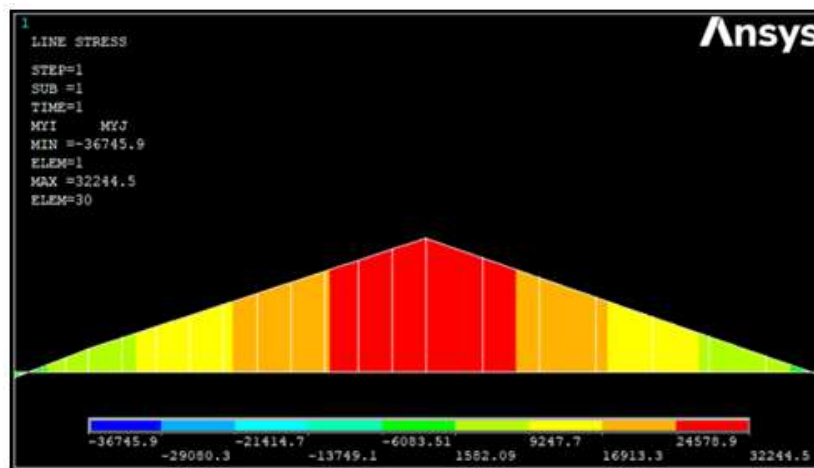


FIGURA 7. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR

4. Resultados y discusión

En Diseño Mecánico, el factor de seguridad es un número que se utiliza para garantizar que un componente o estructura sea lo suficientemente resistente para soportar las cargas esperadas y pueda soportar posibles sobrecargas, aplicadas por accidente [6]. El factor de seguridad se define como la relación entre la carga máxima (carga que puede producir cedencia) que puede soportar el componente o estructura y la carga que se espera que soporte. El factor de seguridad se utiliza para tener en cuenta las incertidumbres en el diseño, la fabricación y el funcionamiento del componente o estructura. Estas incertidumbres pueden incluir [7]:

- Errores en el cálculo de las cargas.

- Variaciones en las propiedades del material.
- Defectos de fabricación.
- Condiciones ambientales adversas.

Los diseños mecánicos se diseñan para que funcionen dentro de sus límites elásticos. Esto significa que después de que se retiren las cargas, el material volverá a su forma original. La fórmula para calcular el factor de seguridad (FS) es la siguiente:

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_d} \quad (4)$$

Donde; FS es el factor de seguridad, σ_y es el esfuerzo de cedencia del material (en el caso del material utilizado en este proyecto es acero con esfuerzo de cedencia de 250 MPa) [III.12] y σ_d es el esfuerzo de diseño F (esfuerzo nominal). Por lo tanto:

$$FS = \frac{250 \text{ MPa}}{8 \text{ MPa}}$$

$$FS = 31.25$$

Si el chasis se diseñó considerando un peso de 75 kg, el factor de seguridad obtenido dice que puede cargar hasta 2 300 kg. Esto debido a la resistencia del material y la rigidez del diseño. En general, los factores de seguridad típicos para componentes mecánicos que funcionan dentro de la zona elástica son de 1.5 a 2.0. Sin embargo, los factores de seguridad pueden ser mucho más altos para componentes críticos o en condiciones ambientales adversas [8].

5. Conclusiones

El diseño de un robot de rescate debe cumplir con requisitos fundamentales, como movilidad, adaptabilidad y durabilidad. Debe ser capaz de maniobrar en entornos difíciles, soportar condiciones extremas y acceder a espacios reducidos. Entre los diversos diseños de chasis, el tipo marco ofrece ventajas significativas para un robot móvil destinado al rescate de personas en terrenos difíciles. Permite una gran flexibilidad para la instalación de diferentes tipos de equipamiento, lo cual es crucial porque el equipo puede necesitar sensores especializados, cámaras, equipos de iluminación y brazos mecánicos para diversas operaciones de rescate. Con este arreglo es más sencillo agregar o reubicar componentes para adaptarse a las necesidades específicas del rescate, al ser abierto, permite un flujo de aire constante ayudando a mantener los componentes a temperaturas seguras.

Además, el acceso para mantenimiento es más fácil, lo cual puede ser crítico cuando el robot debe operar durante períodos prolongados. Aunque el chasis tipo marco es más ligero, puede ser diseñado para ser resistente y duradero. Utilizando materiales robustos como acero o aluminio, el marco puede resistir golpes, vibraciones y condiciones extremas, algo esencial para robots de rescate. La estructura abierta también puede absorber impactos y reducir el riesgo de daños en comparación con un chasis completamente cerrado, que puede sufrir deformaciones más severas en caso de impactos.

6. Bibliografía

1. Kumar, A. H. y Deepanjali, V., Design & analysis of automobile chassis, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, Vol. 5, No. 1, pp 187-196, 2016.
2. Fenton, J., Handbook of Automotive Body Construction & Design Analysis, Ed. Wiley, 1998.
3. Roper, S. W. K. y Kim, I. Y., Integrated topology and packaging optimization for conceptual-level electric vehicle chassis design via the component-existence method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D; Journal of Automobile Engineering*, Vol. 237, No. 9, pp 2118-2131, 2023.
4. Urriolagoitia-Sosa, G., Romero-Angeles, B., Hernandez-Gomez, L. H., Torres-Torres, C., Urriolagoitia-Calderón, G. Crack-compliance method for assessing residual stress due to loading/unloading history: Numerical and experimental analysis. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 56, No. 3, pp. 188-199, 2011.
5. Romero-Ángeles, B., Hernández-Campos, D., Urriolagoitia-Sosa, G., Torres-San Miguel, C. R., Rodríguez-Martínez, R., Martínez-Reyes, J., Urriolagoitia-Calderón, G. Design and manufacture of a forearm prosthesis by plastic 3d impression for a patient with transradial amputation applied for strum of a guitar. *Engineering Design Applications*, pp. 97-121, 2019.
6. Urriolagoitia-Sosa, G., Romero-Ángeles, B., Méndez-Romero, D., Rodríguez-Martínez, R., Torres-San Miguel, C. R., Martínez-Reyes, J., Urriolagoitia-Calderón, G. Numerical analysis of the knee articulation leg. The angular position parameters and forces acting on the joint were obtained and applied into the corresponding, during different stages of the gait process. *Engineering Design Applications*, pp. 123-142 2019.
7. Musto, J. C., The safety factor; Case studies in engineering judgment, *International Journal of Mechanical Engineering Education*, Vol. 38, No. 4, pp 286-296, 2010.
8. Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T. y Mazurek, D. F., *Mecánica de Materiales*, 5a edición, Ed. Mc Graw Hill, 2010.

Técnicas novedosas aplicadas al análisis de engranes rectos

Jiménez, R. H.,¹ Vázquez, G. B.,² Ramírez, C. J. L.,³ García, S. P.,⁴ Bravo. A. A. G.,⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}AUniversidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Departamento de Energía.

hjr@azc.uam.mx, bvg@azc.uam.mx, joseluis_rc@hotmail.com, pegase@azc.uam.mx,
mcagbh@yahoo.com.mx

1. Resumen

En este trabajo se caracteriza virtualmente el comportamiento cinemático del sistema de engranes que integran una caja de velocidades para camiones de tamaño pequeño y medio. El procedimiento para generar cada componente, integrarlos al sistema, establecer las restricciones de movimiento entre ellos y animarlos se muestra con detalle. Tal animación permite observar de manera objetiva, didáctica y pedagógica parámetros tales como línea de presión, relación de contacto, posibles interferencias, un método para evitar la reacción. Este trabajo contribuye con elementos de juicio para analizar los problemas de operación del sistema y permitir a ingenieros, académicos e industriales; establecer posibles soluciones para evitar los efectos al medio ambiente por contaminación térmica y acústica; adicionalmente evitar riesgos al personal y pérdidas económicas a las industrias.

2. Introducción

En aulas, laboratorios y talleres; tanto en la industria como en la academia; es importante analizar, sintetizar y evaluar; el comportamiento de los sistemas de engranes, para tomar decisiones respecto a posibles acciones predictivas, minimizando las preventivas e intentando hacer nulas las correctivas. Algunos artículos que corroboran tal importancia se mencionan a continuación.

Alberto D. I.^[1], determina las fuerzas de engrane a partir de un procedimiento híbrido, incorporando el efecto del lubricante, así como la fricción por deslizamiento. Jorge L. M., Et al^[2], usaron el algoritmo genético de tipo NSGA II para tres pares de funciones objetivo: mínima tensión en el pie del diente-mínimo volumen de la transmisión; mínima tensión en el pie del diente-máximo factor de recubrimiento; mínimo volumen de la transmisión-máximo índice de robustez. Ana B. F., Et al^[3], exponen cómo los engranajes cilíndricos de dientes rectos interiores tienen sus particularidades, con respecto a los engranajes cilíndricos de dientes rectos exteriores.

3. Condiciones experimentales

El sistema, mostrado en la Figura 1, está compuesto por un eslabón fijo no mostrado, cuatro ejes y diez engranes rectos numerados del 2 al 11. El engrane 2 gira solidario al eje 1. Con el eje 2 giran los engranes 3, 4, 5 y 6. Los engranes 7, 8 y 9 giran con el eje 3. Con el eje 4 giran los engranes 10 y 11, el 11 es el más cercano al plano xy. La caja es de cuatro velocidades más la reversa, como se indica en la Tabla 1.

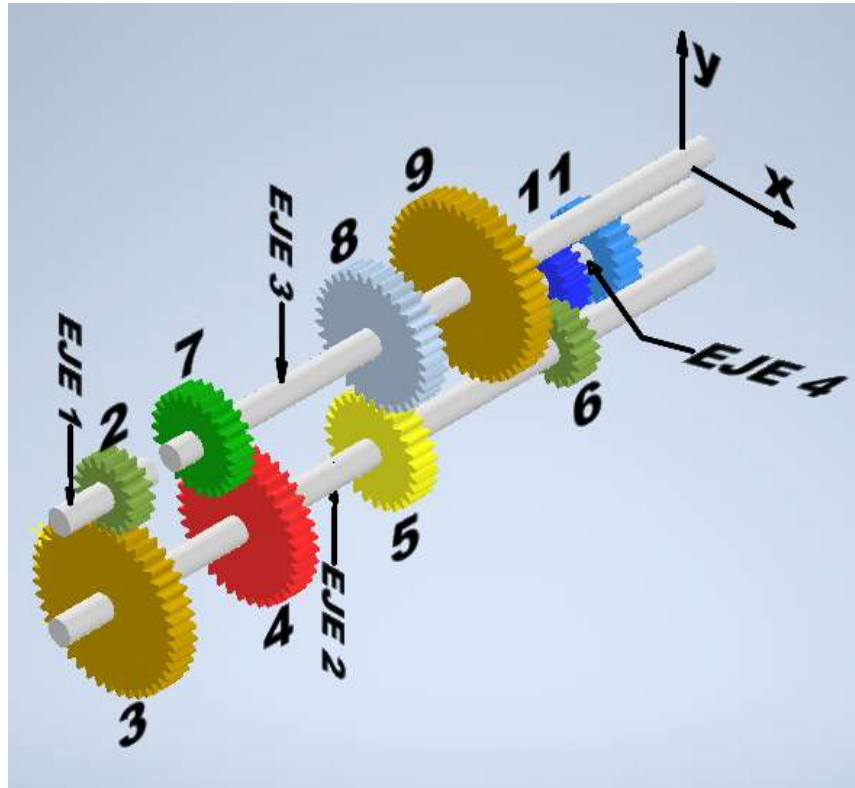


Figura 1. Sistema experimental

Tabla 1. Transmisión para cada velocidad

Velocidad	1	2	3	4	Reversa
Transmisión	2-3-6-9	2-3-5-8	2-3-4-7	Directa	3-4-6-10-11-9
Engrane- dientes	2-17	3-43	4-36	5-27	6-17
	7-24	8-33	9-43	10-18	11-22

3.1 Componentes.

Para cada uno de los engranes, considerando los datos de entrada: paso ($P = 8$), número de dientes (N variable) y ángulo de presión ($\phi = 25$ grados); en una hoja electrónica de cálculo se determinaron las coordenadas de la cara-flanco (evoluta) del perfil; tales coordenadas se exportaron al archivo gráfico; se generó el boceto con base al cual se realizó la operación de extrusión; en el pie del medio diente se efectuó un empalme, de 0.25 entre el paso diametral; una operación de simetría permitió obtener el diente completo y un medio claro a cada uno de sus lados; un arreglo circular, con tantas repeticiones como dientes corresponden a cada engrane se generó éste; el barrenado de una pulgada de diámetro se realizó con una extrusión usando la opción cortar; el ángulo subtendido por medio diente es menor que el ángulo subtendido por medio claro, la diferencia en grados es 0.4 entre el paso diametral, tal diferencia permite evitar el efecto de reacción; El espesor es de 0.1 pulgada. La Figura 2 muestra el perfil usado para generar uno de los engranes.

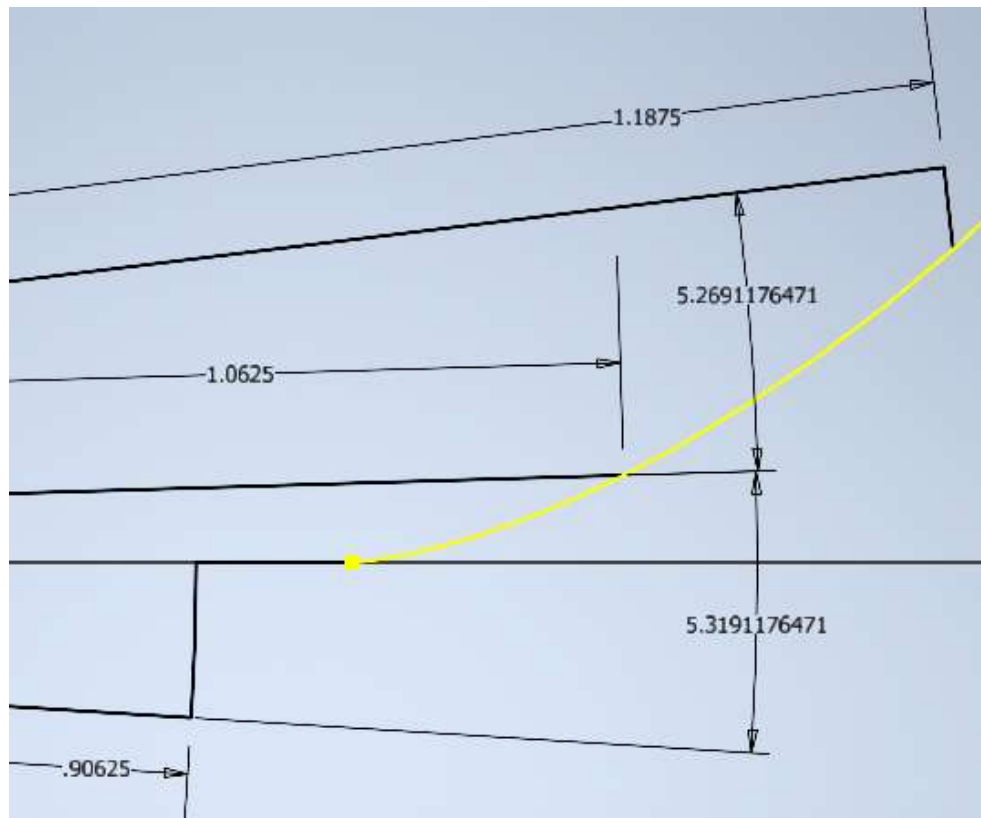


Figura 2. Perfil de medio diente y medio claro para el engrane 6

3.2 Restricciones cinemáticas entre componentes.

En un archivo gráfico de ensamble, se insertó la bancada (no mostrada) y se fijó; los componentes restantes se insertaron en el orden siguiente: eje 1, eje 2 y eje 3 los que se restringieron permitiéndoles solo un grado de libertad (rotación), los cuatro ejes son paralelos entre sí, en particular los ejes 1 y 3 son además colineales; engrane 2 al que se le permitió una rotación controlada solidaria con el eje 1, en función de la cual giran los demás; engranes 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, los cuatro primeros se giraron para acoplar correctamente sus dientes con los correspondientes engranes 2, 7, 8 y 9; engranes 10 y 11, el 10 se giró para acoplar correctamente sus dientes con los del engrane 6, el 11 se giró para acoplar correctamente sus dientes con los del engrane 9. Para una velocidad angular unitaria del eje 1, la velocidad angular del eje 2 será igual a 17 entre 43. Para una velocidad angular unitaria del eje 2, con la palanca de velocidades en primera, la velocidad angular del eje 3 será igual a 17/43. Para una velocidad angular unitaria del eje 2, con la palanca de velocidades en segunda, la velocidad angular del eje 3 será igual a 27/33. Para una velocidad angular unitaria del eje 2, con la palanca de velocidades en tercera, la velocidad angular del eje 3 será igual a 36/24. Para una velocidad angular unitaria del eje 2, con la palanca de velocidades en reversa, la velocidad angular del eje 4 será igual a 17/18; la velocidad angular del eje 3 será $(17/18) \cdot (22/43)$. El procedimiento para acoplar correctamente un engrane con otro se ilustra en las Figuras 3 y 4; se trazó la línea de centros (en color cian) y la línea de presión; se proyectaron las geometrías de las evolutas cuyas caras-flancos deben contactar tangencialmente; se generaron líneas radial desde el centro del engrane que se adaptará a su pareja, las cuales son de igual magnitud, el extremo de una de ellas coincide con la evoluta del engrane que girará para adaptarse, el extremo de la otra coincide con la línea de presión y con la evoluta del engrane de referencia. En la Figura 5 se muestran los dientes de ambos engranes acoplados correctamente.

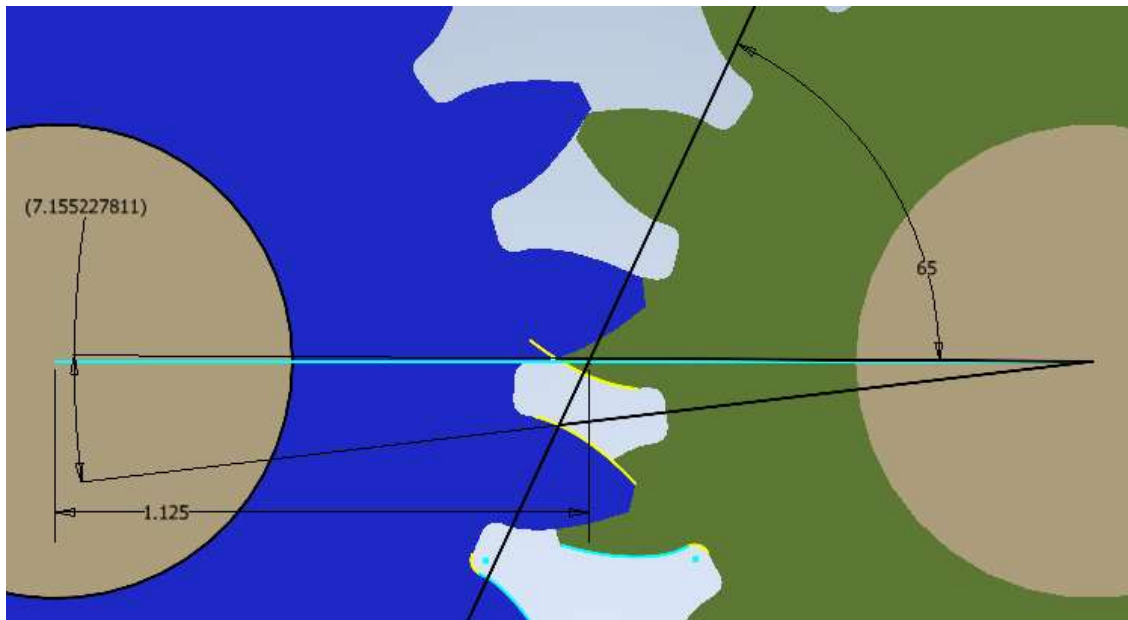


Figura 3. Procedimiento para acoplar correctamente el engrane 6 con el 10

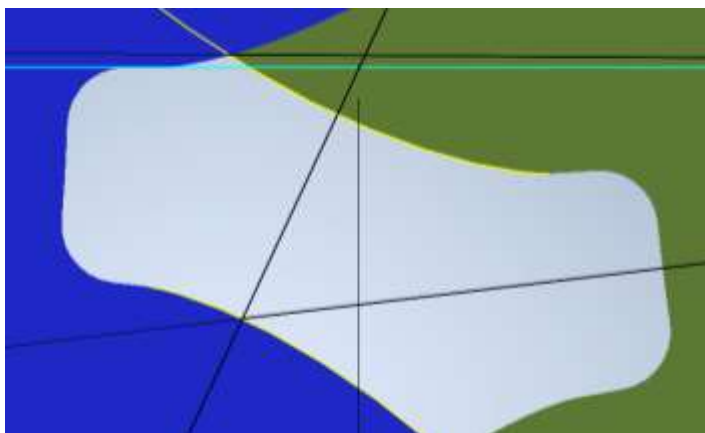


Figura 4. Detalle de la Figura 3

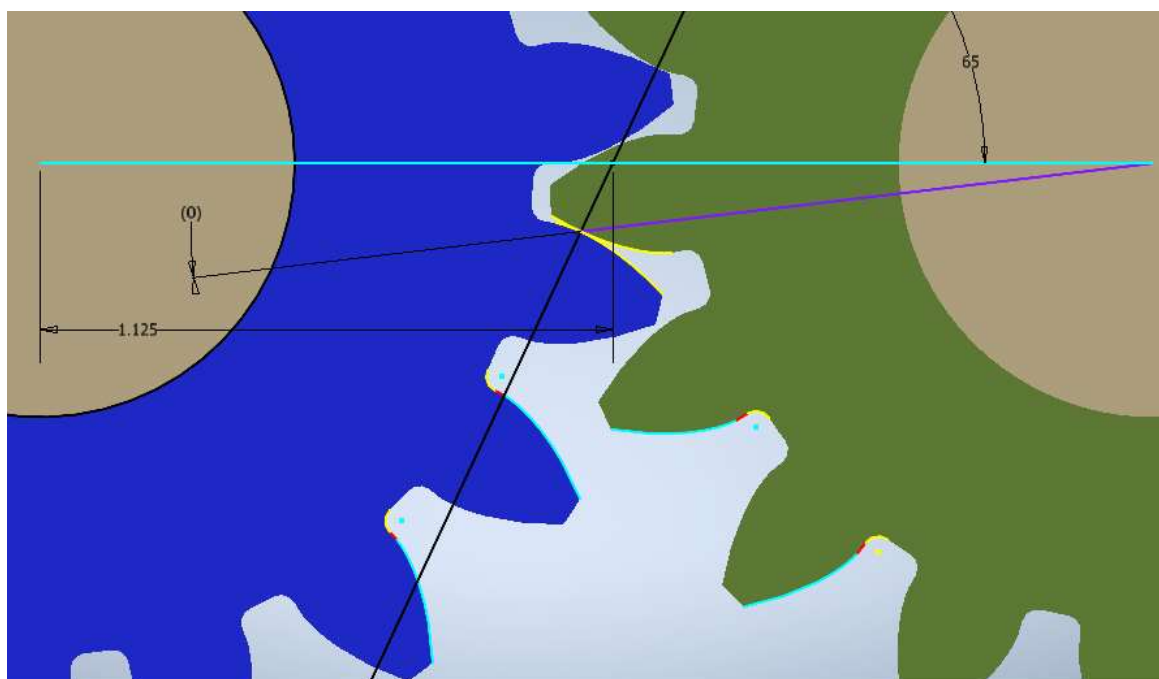


Figura 5. Evolutas en contacto tangente

3.3 Animación de componentes.

Un video en formato MP4 está disponible con los editores de las memorias. Para cada una de las velocidades las posiciones relativas entre engranes se indican a continuación.

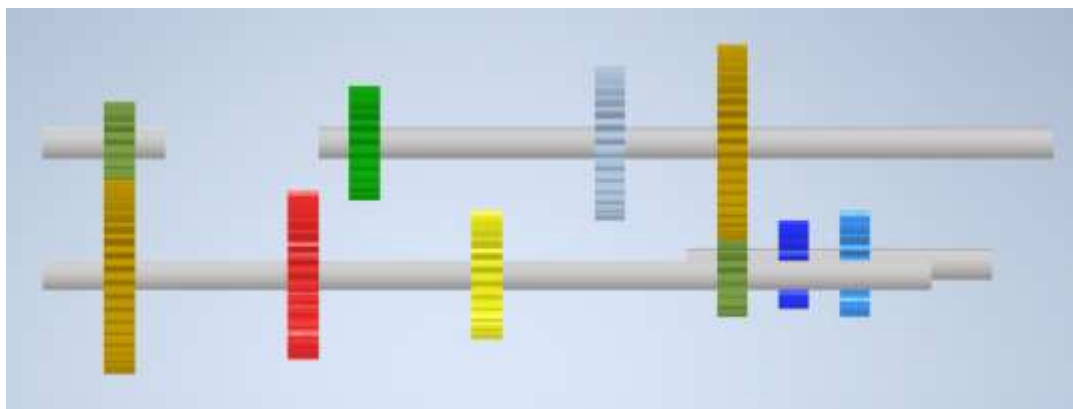


Figura 6. Caja de velocidades en primera

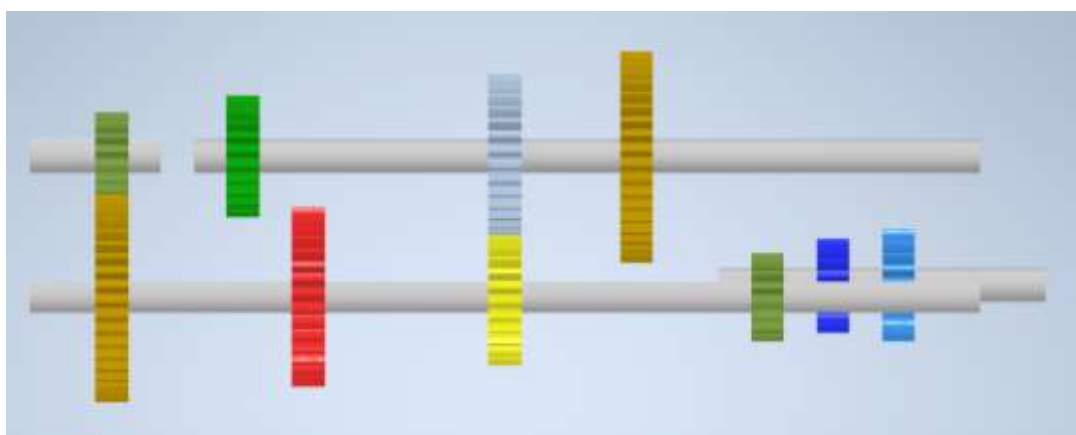


Figura 7. Caja de velocidades en segunda

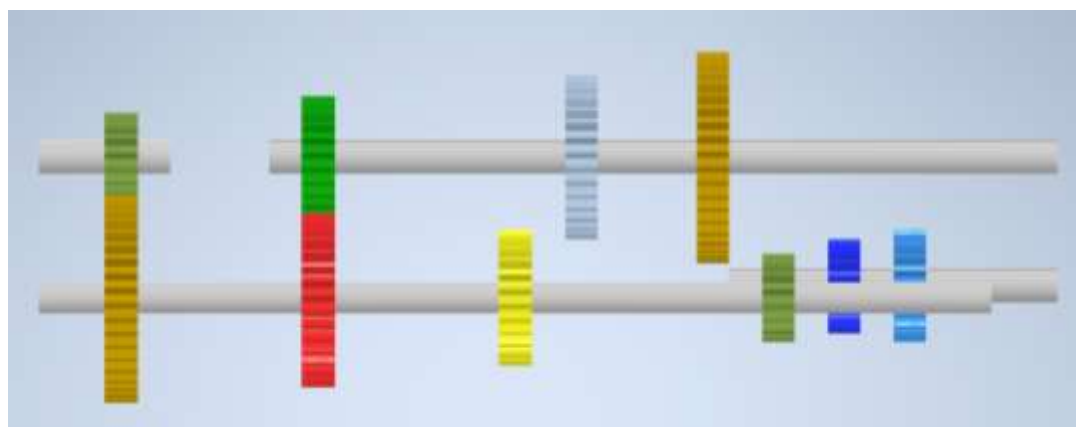


Figura 8. Caja de velocidades en tercera

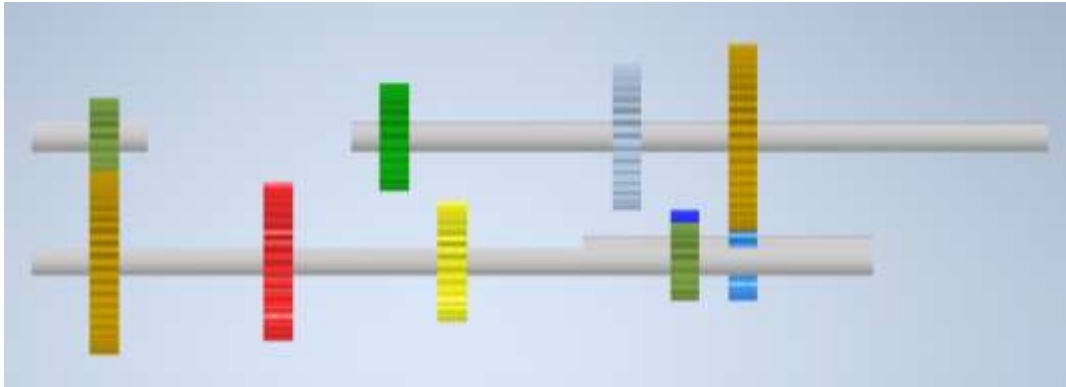


Figura 9. Caja de velocidades en reversa

El concepto de línea de presión (A-B) y relación de contacto (dos pares de dientes en contacto durante un diferencial de tiempo y un par de dientes en contacto en otro) se pueden observar en las Figuras 10, 11, 12 y 13.

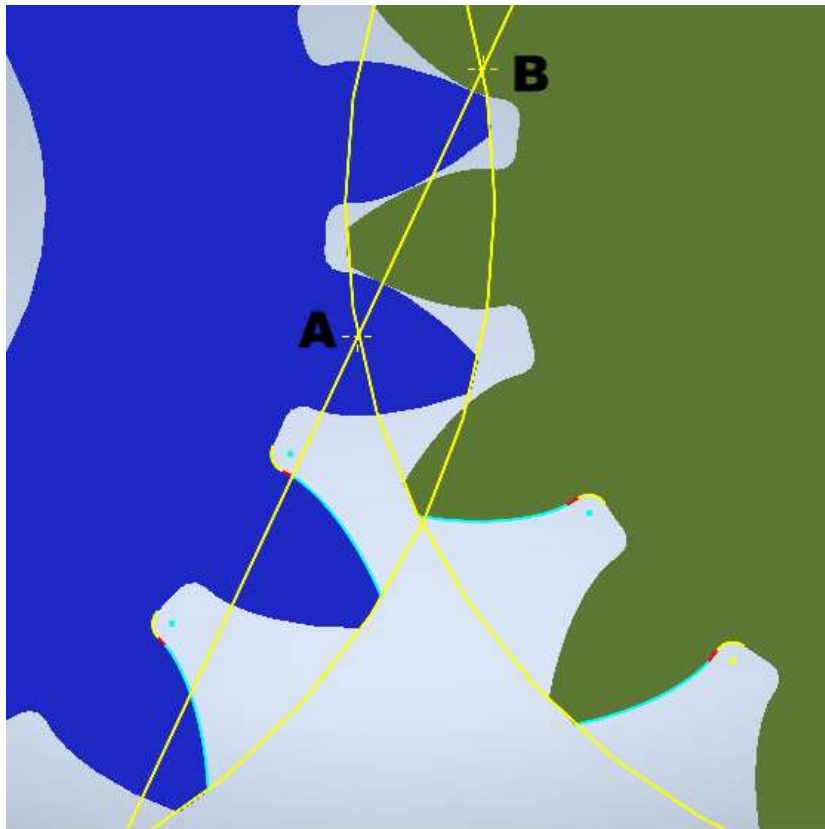


Figura 10. Par de engranes en su posición inicial

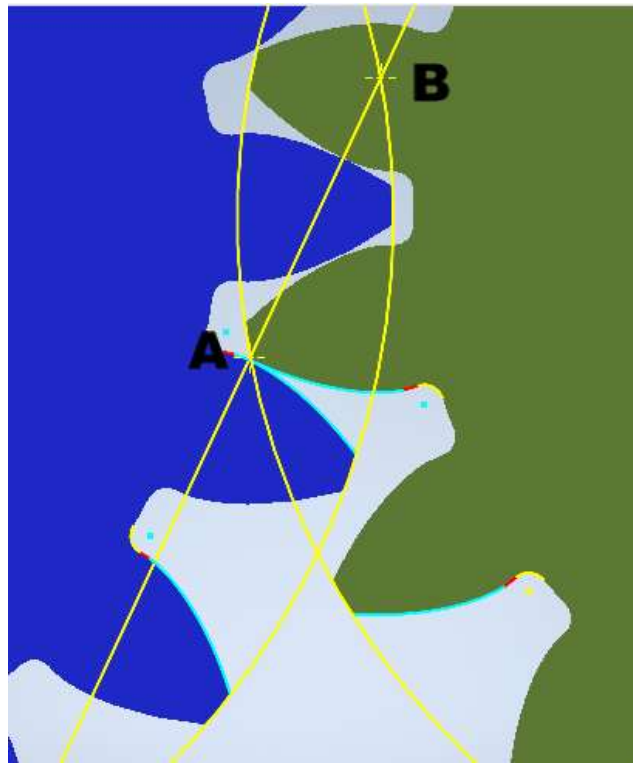


Figura 11. Inicio de contacto del primer par de dientes a monitorear

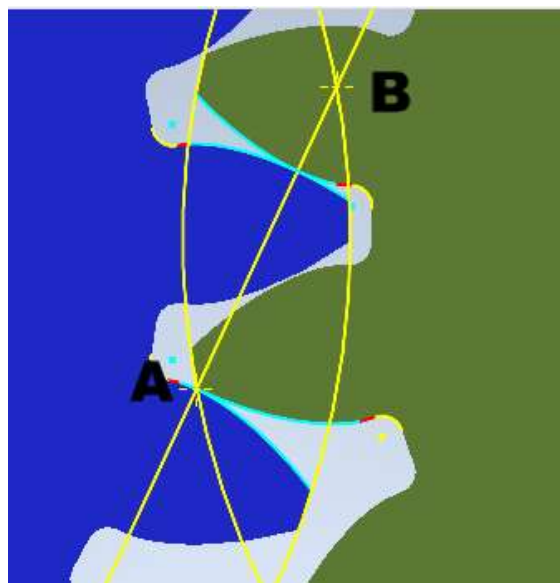


Figura 12. Inicio de contacto del segundo par de dientes a monitorear

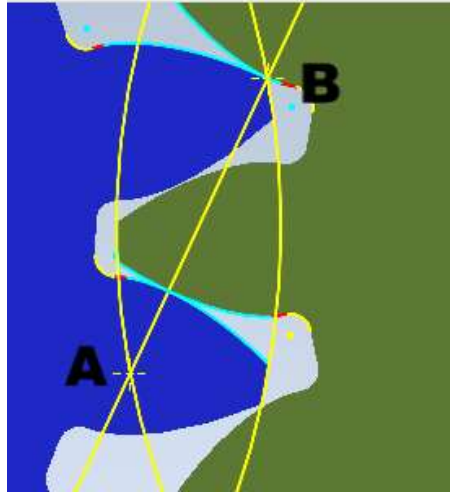


Figura 13. Fin de contacto del primer par de dientes a monitorear

4. Resultados y discusión

Este trabajo contribuye con elementos de juicio para analizar los problemas de operación del sistema y permitir a ingenieros, académicos e industriales; establecer posibles soluciones para evitar los efectos al medio ambiente por contaminación térmica y acústica; adicionalmente evitar riesgos al personal y pérdidas económicas a las industrias.

La caracterización cinemática, virtual y tridimensional de la caja de velocidades permite observar: La posibilidad de interferencia entre un par de engranes cuando en uno, o en ambos, la cara-flanco contiene una parte radial causante de tal interferencia. El contacto tangencial entre caras-flancos de un par de dientes siempre sobre la línea de presión. La temporalidad relativa entre contacto de un par de dientes y contacto de dos pares de dientes.

5. Conclusiones

Las condiciones experimentales y los resultados permiten vislumbrar amplias posibilidades de mejorar la operación de este sistema mostrado y de cualquier otro, usando métodos computacionales que cada vez hacen más obvia la realidad aumentada en el campo virtual. Tales métodos virtuales pueden coadyuvar a optimizar

los procesos de fabricación, instalación, pruebas, puesta a punto, operación, servicio y mantenimiento; para reducir los efectos al medio ambiente evitando, además, riesgos al personal y pérdidas económicas a las industrias.

6. Bibliografía

1. Alberto D. I., "ESTUDIO DE LA EFICIENCIA Y FENÓMENOS DISIPATIVOS DE ENGRANAJES CON CORRECCIONES DE TALLADO Y MODIFICACIÓN DEL PERFIL", TESIS DOCTORAL, UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica, septiembre de 2016.
2. Jorge L. M., José R. M., Paul M. T. "Optimización multiobjetivo en transmisiones por engranajes cilíndricos de dientes rectos asimétricos" Universidad Tecnológica de la Habana, Abril de 2020.
3. Ana B. F., Jorge M. R., Roque M. O., Salvador G. M. "Perfeccionamiento del diseño de transmisiones por engranajes cilíndricos de dientes rectos interiores", REVISTA CIENTÍFICA. Junio de 2012.

Extracción ultrasónica de metabolitos secundarios de hojas de mastuerzo (*Tropaeolum majus*) y su aplicación en la biosíntesis de nanopartículas de plata

Mata-Zamora, M. E., Sato-Berrú, R., Vázquez-Olmos, A.

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología

Universidad Nacional Autónoma de México,

Circuito Exterior S/N, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México

esther.mata@icat.unam.mx, roberto.sato@icat.unam.mx,
america.vazquez@icat.unam.mx

1. Resumen

En este trabajo se presenta el estudio de extractos de hojas de mastuerzo (*Tropaeolum majus*) obtenidos por el método de extracción asistido por ultrasonido. Los extractos se obtuvieron a 20 KHz, 120 W, con un tiempo de procesamiento de 10 minutos y como disolvente se utilizó agua desionizada. Con el fin de estudiar las diferencias entre extractos con diferente cantidad de masa procesada, cada uno de ellos se puso en contacto con disoluciones de nitrato de plata (10^{-3} M). La reacción entre los iones de plata y los componentes de los extractos confirmaron la formación del plasmón en 430 nm característica de las nanopartículas de plata. El cambio en la forma de esta señal podría suponer diferencia en la concentración y tipo de biomoléculas presentes en los extractos por efecto de la densidad del material procesado (masa vegetal/volumen de agua).

2. Introducción

Las plantas sintetizan una gran variedad de biomoléculas con propiedades que pueden aprovecharse en diversos campos como de la medicina, alimentación, agrotecnología, entre otros. Desde el punto de vista del organismo vegetal, la generación de tales biomoléculas activas le sirve para sobrevivir o resistir a las adversidades del medio ambiente. Todos estos compuestos también conocidos como componentes secundarios se encuentran distribuidos en diferentes partes de la planta, ya sea en hojas, tallos, raíces, flores o semillas ^[1]. Entre los componentes más comúnmente encontrados están los polifenoles, flavonoides, alcaloides, terpenoides, entre otros ^[2]. Para obtenerlos se han empleado diferentes métodos de extracción entre los que se destacan los convencionales como la maceración, la infusión, la extracción por arrastre de vapor, método Soxhlet; y entre los menos convencionales, la extracción asistida por ultrasonido o asistida con microondas por mencionar algunas.

Los métodos de extracción más comunes utilizados para obtener metabolitos secundarios a partir del material vegetal del mastuerzo (*Tropaeolum majus*) son la maceración con mezclas de solventes hidroetanólicos ^[3], seguido del método Soxhlet y menos frecuente es el método de extracción asistido por ultrasonido ^[4]. Este último tiene la ventaja de emplear bajos volúmenes de disolvente y tiempos de procesamiento que va de los 10 a los 60 minutos, dependiendo de la potencia ultrasónica suministrada y la configuración del arreglo experimental ^[5]. El sustento de la técnica radica en el fenómeno de cavitación, es decir, cuando un líquido se somete a una onda ultrasónica con suficiente potencia (10 W/cm^2), el líquido se comprime y se expande en ciclos con la onda ultrasónica, formando pequeñas burbujas o cavidades. Cuando alcanzan un tamaño crítico estas burbujas explotan. El colapso de estas burbujas puede causar daño considerable a la matriz vegetal facilitando tanto la penetración del disolvente como el proceso de transporte de los componentes moleculares al medio líquido. Los parámetros experimentales que se deben considerar, además de la frecuencia y potencia de las ondas ultrasónicas, son la concentración del material vegetal sólido, tipo de disolvente, temperatura, tiempo de procesamiento, configuración del equipo de ultrasonido. Este último parámetro se refiere a la geometría del dispositivo generador de las ondas de ultrasonido, en nuestro caso se utilizó una punta de tres milímetros de diámetro conectada a un generador de ultrasonido, este aditamento permite concentrar la densidad de energía ultrasónica en un volumen de muestra a procesar ^[5].

La composición química de los extractos de hojas, flores o semillas de mastuerzo es variada según lo reportado en la literatura disponible, en general se han encontrado flavonoides, glucosinolatos, ácidos grasos, aceite esencial, ácido clorogénico, aminoácidos cucurbitacinas, proteínas y carotenoides ^[6]. En el presente trabajo se realizó el estudio de la biosíntesis de nanopartículas de plata aprovechando el efecto reductor que tienen las biomoléculas sobre los iones metálicos ^[7]. La variable que se estudió fue el efecto de la formación del plasmón en función de la cantidad de materia vegetal en agua en el proceso de extracción. El estudio de los espectros de absorción UV-visible es sencillo de realizar consumen poco tiempo y permiten confirmar la síntesis de las nanopartículas de plata. Se ha asimilado que la forma y posición del plasmón puede dar cuenta de la forma y tamaño de las nanopartículas ^[8]. Adicionalmente, se incluyen los espectros infrarrojos de los extractos de hojas de mastuerzo (*T. majus*) antes y después de la formación de las nanopartículas de plata en los cuales se puede estudiar la interacción de los grupos funcionales de las biomoléculas responsables de la estabilidad de las nanopartículas una vez formadas ^[9].

3. Condiciones experimentales

3.1 Reactivos químicos

Agua desionizada, nitrato de plata (AgNO_3 98 %), todos de Sigma-Aldrich.

3.2 Material vegetal y preparación de los extractos

Las hojas de mastuerzo se colectan del Bosque de Tlalpan, se lavan, secan a temperatura ambiente y se muelen en un mortero de cerámica. El polvo se tamiza para obtener una distribución de tamaño de partícula homogéneo. La extracción asistida con ultrasonido consiste en colocar el polvo de las hojas secas de mastuerzo (0.2, 0.1, 0.5 y 0.1 g) en contacto con 10 mL de agua desionizada, se agita para integrar y humedecer muy bien el material. El envase donde se coloca la preparación debe ser de vidrio y de preferencia de forma cilíndrica (5 cm de largo y 1 cm de diámetro), esto permite homogenizar adecuadamente la mezcla durante la aplicación de las ondas ultrasónicas. El equipo de ultrasonido utilizado es un SONICS vibra cell VCX130W, 20 kHz, con una punta ultrasónica de 3 mm de diámetro. Los extractos se obtienen a 120 W, con un tiempo de procesamiento de 10 minutos. La temperatura se mide al inicio (23 °C) y al final (47 °C) del proceso. Posterior a la sonicación, la separación de la fase sólida y el extracto (sobrenadante) se lleva a cabo por centrifugación en un equipo Hermle Labortechnik GmbH Z36 HK a 10000 rpm por 10 minutos. El extracto se almacena en oscuridad en frascos de vidrio.

3.3 Preparación de las nanopartículas de plata

Los extractos obtenidos se diluyen en agua desionizada al 5% V/V. Una vez diluidos se ponen en contacto con disoluciones acuosas de nitrato de plata (AgNO_3 , 10^{-2} M). Para esto se prepara un volumen de 5 mL de extracto diluido y 0.5 mL de nitrato de plata, la concentración final resulta de aproximadamente 10^{-3} M. La formación de las nanopartículas se evalúa haciendo el seguimiento de la señal característica del plasmón observada en un espectrómetro de absorción UV-visible.

3.4 Medición de los espectros UV-Visible e infrarrojo

Los espectros de absorción UV-Visible se obtuvieron con un espectrómetro Ocean Optics HR 4000 GC-UV-NIR. Se acondiciona una fuente de luz blanca para acelerar la formación de las nanopartículas de plata. Las mediciones se hacen entre 300 y 800 nm. Los espectros infrarrojos se obtienen en un espectrómetro Nicolet iS50R equipado con un aditamento horizontal de Reflectancia Total Atenuada (ATR por sus siglas en inglés), SMART-iTX. Los espectros de los extractos sin y con plata se colectan en modo absorbancia después de dejar secar una microgota (2 μL) de los extractos sobre la ventana del aditamento. Cada espectro es el promedio de 32 barridos a 4 cm^{-1} de resolución. Las mediciones se realizan entre 4000 y 525 cm^{-1} .

4. Resultados y discusión

4.1 Extracción asistida por ultrasonido

En la Figura 1 se muestra el arreglo experimental utilizado para la extracción de los componentes secundarios o biomoléculas de las hojas de mastuerzo (*T. majus*).



Figura 1. Arreglo experimental para la extracción asistida con ultrasonido. A la izquierda y en medio se muestra la punta ultrasónica y la fuente de ultrasonido. A la derecha el extracto de hojas de T. majus.

La punta ultrasónica se introduce en las preparaciones evitando que toque las paredes y la base del recipiente. La potencia del equipo se ajusta a 120 W (92% de amplitud) a la frecuencia fija de 20 kHz. El volumen de agua desionizada empleado en todos los ensayos es de 10 mL y se pesan 0.2, 0.1, 0.05 y 0.01 gramos de hojas de mastuerzo pulverizadas para cada ensayo, esto corresponde a concentraciones en porcentaje de 2, 1, 0.5 y 0.1 % peso de masa vegetal/volumen de agua. El tiempo de procesamiento se deja en 10 minutos con el fin de evitar un aumento excesivo de temperatura. El extracto posteriormente se utiliza en la etapa de síntesis verde de nanopartículas de plata.

4.2 Espectros de absorción UV-Vis e infrarrojo de los extractos

Los espectros de absorción UV-Visible se miden entre los 300 nm y 800 nm, tal como se observa en la Figura 2. La banda de absorción en 673 nm de los extractos con menor contenido de masa se atribuye a la clorofila. En la región de longitudes onda por debajo de los 500 nm se encuentran la contribución de las señales de las diferentes moléculas presentes en los extractos, debido a la concentración inicial de los extractos esta banda se observa saturada. Entre las moléculas que pudieran estar contribuyendo a la absorción están los flavonoides y compuestos polifenólicos [8].

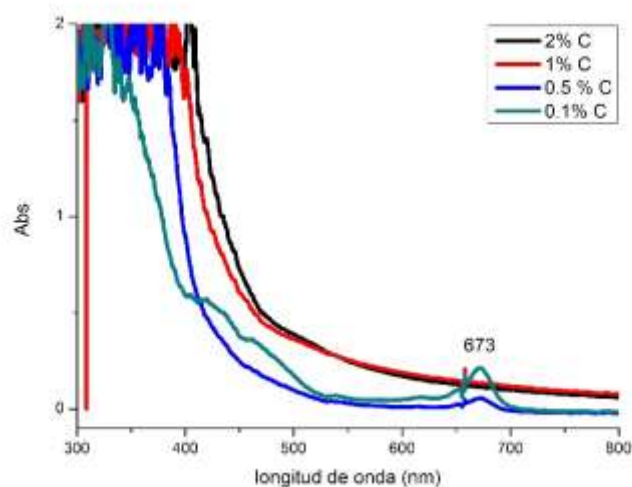


Figura 2. Espectros de absorción UV-Visible-visible de cuatros extractos de hojas de mastuerzo en agua desionizada.

En la Figura 3 se muestra los espectros de absorción infrarroja de los extractos de hojas de mastuerzo en cuatro diferentes concentraciones de masa/volumen, 2, 1, 0.5 y 0.1%. El aditamento ATR permite obtener la señal de pequeñas cantidades de muestra sin la interferencia de las señales del bromuro de potasio presentes cuando se trabaja con la técnica de pastillas KBr. En los espectros se pueden identificar una banda de absorción muy ancha que tiene su máximo en 3204 cm^{-1} que corresponde a las vibraciones de estiramiento de los enlaces -OH del agua y grupos hidroxil (OH) de las moléculas como flavonoides y polifenoles. Las señales a 2921 cm^{-1} y 2849 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de estiramiento de los grupos CH y CH_2 . En la región entre $1200\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ se atribuyen a las vibraciones de estiramiento C-O, C-C y de deformación C-H. Entre los 1420 cm^{-1} y 1300 cm^{-1} se encuentran las vibraciones de deformación en el plano O-H acopladas con las vibraciones de deformación C-H y vibración de estiramiento de anillos bencénicos de la estructura de flavonoides. los diferentes compuestos que contribuyen en la absorción debido a las vibraciones de estiramiento y deformación de los diferentes grupos funcionales, así como de las vibraciones estructurales de las moléculas. La contribución de las vibraciones asimétrica

del grupo COOH y de deformación de OH del agua se encuentran entre 1700 cm^{-1} y 1500 cm^{-1} . Las bandas localizadas en la región entre $1300\text{--}1350\text{ cm}^{-1}$ corresponden a las vibraciones de estiramiento y deformación de los grupos nitrato y al grupo COO^- .

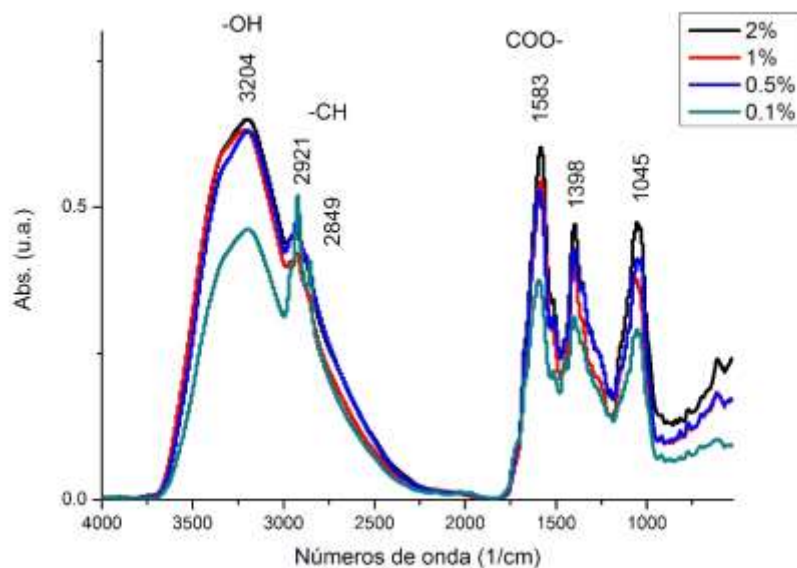


Figura 3. Espectro de absorción infrarroja de los extractos de mastuerzo (*T. majus*) a diferentes concentraciones de masa/volumen, 2, 1, 0.5 y 0.1 %.

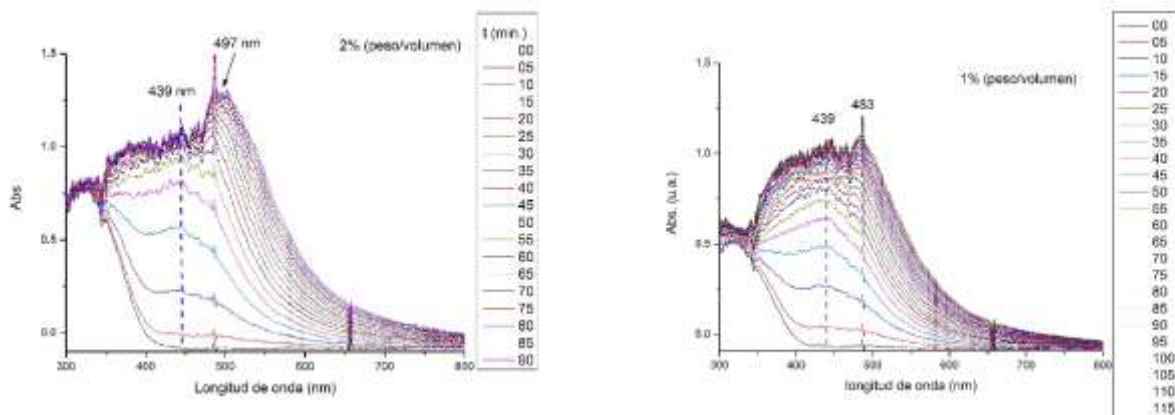
Entre los 1800 cm^{-1} y los 900 cm^{-1} se encuentra la llamada zona huella que se debe a la intensidad relativa de las bandas de absorción debidas a las diversas estructuras de los compuestos presentes en las cuatro muestras. En esta zona las bandas más sobresalientes se ven modificadas por las diferentes contribuciones, ya sea por ausencia o presencia, de las diferentes moléculas presentes en los extractos, la diferencia más notable se observa para el extracto menos concentrado.

4.3 Espectros de absorción UV-vis de los extractos con plata

La síntesis verde de las nanopartículas de plata se lleva a cabo al poner en contacto los extractos con disoluciones de nitrato de plata. Los espectros de absorción UV-visible

se obtienen con los extractos diluidos al 5 % V/V y una concentración final de nitrato de plata de 10^{-3} M. Estos parámetros permiten controlar la velocidad de reducción de los iones de plata, cuando se utiliza la concentración inicial del extracto ocasiona la precipitación rápida de aglomerados muy grandes de plata saturando la señal del espectro de absorción. Por otro lado, otra condición necesaria para que el crecimiento de las nanopartículas no sea demasiado lento es utilizar un fotorreactor con luz blanca, ya que de otro modo la formación y crecimiento de las nanopartículas de plata se lleva a cabo después de 24 horas bajo los parámetros anteriormente mencionados. El arreglo experimental propuesto permite obtener los espectros cada 5 minutos vía el software del espectrómetro, mientras la muestra es irradiada con luz blanca durante dos horas de muestreo.

En las gráficas de la Figura 4 se comparan los espectros de absorción UV-vis de las cuatro diferentes preparaciones en las que se varió la concentración de masa vegetal en 2, 1, 0.5 y 0.1 % en peso/volumen en agua desionizada. La formación y crecimiento de las nanopartículas de plata se puede ir siguiendo por la evolución del plasmón ubicado alrededor de los 430 nm.



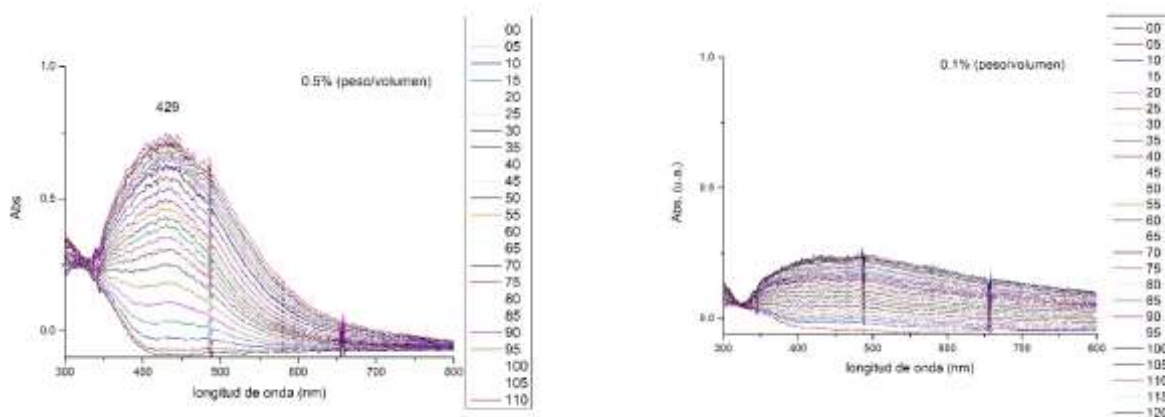


Figura 4. Espectros de absorción UV-vis de los extractos de mastuerzo (*T. majus*) en agua tomados a intervalos de 5 minutos.

A las concentraciones de 2% y 1 % la evolución de la banda de absorción característica del plasmón de resonancia superficial podría suponer la contribución de varias poblaciones con diferente tamaño o forma de partícula ^[7] sobre todo después de los 20 minutos de interacción con las moléculas del extracto. Con la concentración de 0.5% el crecimiento parece ser más homogéneo y se puede definir un máximo de absorción en 429 nm. En el caso de la concentración más baja, 0.1%, el espectro de absorción se observa muy extendido, y a pesar de transcurridas dos horas, no se define máximo de absorción. También, se observa en cada una de las secuencias la disminución de la absorbancia al disminuir la concentración de masa procesada en la extracción. A menor cantidad de masa en el mismo volumen de disolvente durante la extracción podría haber menos probabilidad de que ocurra el proceso de cavitación en las cercanías del material vegetal y por tanto menos probabilidad de extracción de los componentes o biomoléculas. Esto da como resultado menos interacciones entre las biomoléculas con los iones de plata disminuyendo la probabilidad para que ocurra la reducción a plata metálica.

4.4 Espectros de absorción infrarroja de los extractos con plata

Los espectros de absorción infrarroja de los extractos después de la reducción de los iones de plata y posterior formación de las nanopartículas cambian significativamente (Figura 5). La banda de absorción alrededor de los 3336 cm^{-1} que corresponde a los grupos OH se conserva, pero el máximo se recorre a menores energías en comparación a los extractos sin plata. Esto podría ser indicativo de un cambio en los grupos hidroxilo (OH) de las moléculas de flavonoides al ceder electrones o perder hidrógenos, según se describe en el mecanismo de reducción de los iones de plata en el trabajo de Ahmed y colaboradores [8]. Las bandas de absorción en 2925 cm^{-1} y 2845 cm^{-1} , asociadas a los grupos -CH, se conservan sin cambios. La zona huella, entre 1800 cm^{-1} y 500 cm^{-1} es donde se tiene los cambios más significativos debido a la formación de las nanopartículas de plata. Las bandas de absorción a 1349 cm^{-1} y 1309 cm^{-1} son relativamente muy intensas. Se ha reportado que la presencia de los grupos hidroxil (OH) asociados a las vibraciones asimétricas y de deformación de los anillos aromáticos en las biomoléculas están asociado con la estabilización y reducción de los iones de plata (Ag^+) a Ag^0 [9]. Por tanto, la presencia de las nanopartículas modifica las bandas de absorción de estos grupos funcionales que se encuentran entre los 1700 cm^{-1} y los 1200 cm^{-1} .

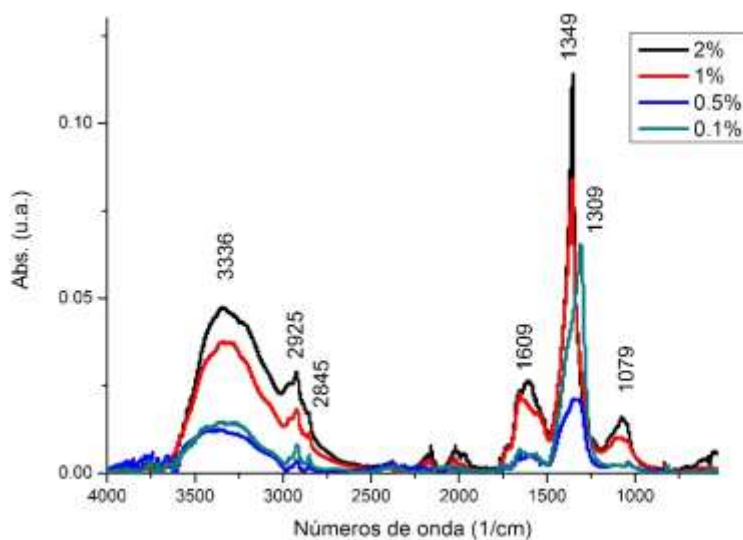


Figura 5. Espectros de absorción infrarroja de los extractos a diferentes concentraciones de masa/volumen, 2, 1, 0.5 y 0.1 %, con nanopartículas de plata.

5. Conclusiones

En este trabajo se pudo constatar que los cambios en la concentración de masa vegetal procesada en la extracción acuosa asistida con ultrasonido afectan la forma y ubicación del máximo del plasmón de las nanopartículas de plata. Esto posiblemente debido a las diferencias en el contenido y tipo de moléculas en los extractos. El análisis de los espectros de absorción infrarroja permite dilucidar que los grupos funcionales hidroxilo son los más afectados en el proceso de reducción de los iones de plata cuando se ponen en contacto con las moléculas presentes en los extractos.

5.1. Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de este trabajo a través del proyecto PAPIIT IN110224 y a la Dra. Selene Islas Sánchez Coordinadora del Laboratorio Universitario de Caracterización Espectroscópica, LUCE-UNAM, por las facilidades para llevar a cabo esta investigación.

6 Bibliografía

1. Delgado G., Romo de Vivar A. Editores, "Temas selectos de química de productos naturales", UNAM (2015) ISBN 978-607-02-7564-7.
2. Jha A. K., Sit N., "Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: A review", Trends in Food Science & Technology 119, 579-591 (2022).
3. Daza C. A. "Evaluación del efecto antimicrobiano y antioxidante de *Tropaeolum majus*". Revisión literaria. Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, (2020).
4. Demasi S., Caser M., Donno D., Enri S. R., Lonati M., Scariot V., "Exploring wild edible flowers as a source of bioactive compounds: New perspectives in horticulture", Folia Hort. 33 (1), 27-48 (2021).
5. Rodrigues S. y Fernandes F. A. N., "En Ultrasound: Advances in Food Processing and Preservation", <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-804581-7.00014-2>, Extraction processes assisted by ultrasound. pp. 351-365 (2017).
6. Calil J., Ferreira C. H., Damo L., de Lima R., Gaube C., Bonilha I., Palermo M., "Traditional usages, batany, phytochemistry, biological activity and toxicology of *Tropaeolum majus* L.– A review", Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas 15(4) 264-273 (2016).
7. Makarov V. V., Love A. J., Sinitsyna S. S., Makarova S. S., Yaminsky M. E., Taliansky N. O. Kalinina N. O., "Green Nanotechnologies: Synthesis of metal nanoparticles using plants", Acta Nature 6(20) 35-44 (2014).
8. Zhang J. Z., Noguez C., "Plasmonic optical properties and applications of metal nanostructures", Plasmonic, DOI 10.1007/s11468-008-9066-y. (2008).
9. Ahmed A., Usman M., Ji Z., Rafiq M., Yu B., Shen Y., Cong H., "Nature-inspired biogenic synthesis of silver nanoparticles for antibacterial applications", Materials Today Chemistry 27, 101339 (2023).

SÍNTESIS DE MOF UiO66-F₄ NANOESTRUCTURADO EN MICROEMULSIONES

Emilene Y. Ugalde Salas¹, Meyling J. Quijano Arteaga¹, M. Edith Navarro Segura¹, Alonso Concha Balderrama¹, Nayeli Pineda Aguilar¹, Margarita Sánchez Domínguez¹

¹Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. (CIMAV), Subsede Monterrey, Alianza Norte 202, Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, 66628, México.

* Autor de correspondencia: margarita.sanchez@cimav.edu.mx

1. Resumen

Los enrejados metal orgánicos (MOFs por sus siglas en inglés) son una clase de materiales porosos con área superficial muy alta y una estructura cristalina bien definida. Recientemente dichos materiales han atraído un gran interés en investigación debido a sus propiedades como estructura regular y su versatilidad, lo que permite aplicarse en almacenar gases, catálisis y separación de sustancias. En este trabajo, se sintetizó el MOF basado en Zirconio UiO-66-F₄, mediante el uso de microemulsiones bicontinuas (Bc) y aceite-en-agua (O/W). El proceso se realizó controlando condiciones de reacción como temperatura, pH, y tiempo de reacción. El MOF obtenido se caracterizó mediante XRD y FE-SEM. Los resultados obtenidos fueron consistentes con la formación del MOFs Zr-UiO-66-F₄ nanoestructurados mediante el uso de microemulsiones, con la particularidad de presentar principalmente reflexiones correspondientes a la estructura alta en defectos (estructura reo), mostrando propiedades que potencialmente presentarán un destacado desempeño en diversas aplicaciones.

2. Introducción

Las microemulsiones son empleadas ampliamente en la producción de nanomateriales y recientemente se ha encontrado su aplicación en la síntesis de MOFs^[1]. El surfactante de las microemulsiones permite que las gotas presentes sean de tamaño nanométrico y se encuentren dispersas en una fase continua. Las micelas de estas microemulsiones actúan como nanoreactores, regulando la nucleación y las tasas de crecimiento de los cristales. La relación agua:tensioactivo y el tipo de tensioactivo regulan el tamaño de las gotas de microemulsión. Este enfoque proporciona un control exacto sobre el tamaño de los nanomateriales.

Los líquidos inmiscibles presentes en las microemulsiones (generalmente agua y aceite) estabilizados por surfactantes, pueden actuar como nanoreactores para la síntesis de MOFs, permitiendo que los precursores metálicos y los ligandos orgánicos se confinen en las gotas de la fase dispersa, donde se produce la nucleación y el crecimiento. La capacidad de controlar el entorno de reacción a nivel nanométrico permite obtener MOFs con tamaños, morfologías bien definidas y una alta reproducibilidad. Los MOFs sintetizados mediante microemulsiones tienen una amplia gama de aplicaciones debido a sus propiedades únicas, como alta porosidad, gran área superficial específica y la capacidad de ser funcionalizados. Son versátiles y prometen mejorar diversas tecnologías debido a sus propiedades únicas y la capacidad de sintetizarlos con características específicas. Debido a su alta porosidad, enorme superficie y estructuras con cavidades, los MOF son valiosos en numerosas aplicaciones, como separación de gases, catálisis, adsorción de contaminantes, biomedicina, sensores y energía^[2].

Desde la década de 1980, las microemulsiones comenzaron a ser exploradas como medio para la síntesis de nanopartículas debido a su capacidad para controlar el tamaño y la morfología de las partículas formadas ^[3]. Las microemulsiones han demostrado ser una alternativa para superar las limitaciones de los métodos tradicionales, como el control limitado sobre el tamaño de partícula y la uniformidad morfológica. Las microemulsiones actúan como nanoreactores proporcionando un entorno homogéneo para la nucleación y el crecimiento de los cristales de MOFs ^[4].

Con el reconocimiento del potencial de los Zr-MOFs debido a su estabilidad excepcional, los investigadores comenzaron a buscar métodos para sintetizar estos materiales con un control preciso del tamaño y la forma, lo que condujo al uso de microemulsiones como una herramienta eficaz ^[5]. Como lo menciona Ghobadi et al., ^[6] en su trabajo acerca de la obtención del MOF UiO-66 por el método de microemulsión, donde expresa que los parámetros de síntesis afectan directamente la morfología y las propiedades del MOF resultante. De igual manera, Nugent et al., ^[7] en su trabajo aprovechó las propiedades de adsorción de los MOFs funcionalizados, como el UiO-66-F₄, destacando la importancia de la síntesis controlada en la obtención de materiales con rendimiento optimizado.

En este trabajo, investigamos metodologías innovadoras para el desarrollo de novedosas superestructuras jerárquicas (SEJs) de MOFs basados en Zirconio UiO-66-F₄, mediante estrategias poco convencionales basadas en el uso de diferentes sistemas de microemulsiones bicontinuas (BC) y aceite-en-agua (O/W). Las microemulsiones O/W o W/O (agua-en-aceite) proporcionan una plataforma versátil para la síntesis de una amplia gama de arquitecturas MOF, incluyendo estructuras cristalinas tradicionales. Por otro lado, los nanocanales infinitos de agua y aceite presentes en las microemulsiones bicontinuas presentan el potencial de permitir la formación de estructuras autoensambladas, superestructuras jerárquicas y materiales compuestos. Mediante un ajuste

cuidadoso de la composición y las propiedades del sistema de microemulsión, es posible adaptar las características de los MOF resultantes para satisfacer requisitos específicos ^[8].

El uso de zirconio en microemulsiones para sintetizar MOFs ha mostrado avances prometedores, particularmente a través de métodos de microemulsión de líquido iónico ^[9,10]. La investigación indica que los MOFs basados en zirconio, como el UiO-66, se pueden sintetizar de manera efectiva utilizando líquidos iónicos como moduladores, que mejoran la estabilidad y funcionalidad de los materiales resultantes. El método de microemulsión de líquido iónico se ha destacado por su respeto al medio ambiente y su capacidad para controlar el tamaño y la morfología de los MOF sintetizados. La investigación sobre los MOFs es un área de gran interés en los últimos años, debido a sus propiedades y su aplicación potencial en distintas áreas ^[11]. Aunado a esto, las superestructuras jerárquicas (SEJs) de MOFs ofrecen aún mayores ventajas con posibilidades aún por descubrir y prometen mejorar diversas tecnologías debido a sus propiedades únicas y la capacidad de sintetizarlos con características específicas ^[2,4].

3. Condiciones experimentales

La síntesis de Materiales Orgánico-Metálicos como el UiO-66-F₄, un derivado del UiO-66 con grupos tetrafluorados, puede ser controlada y optimizada utilizando microemulsiones como medio de reacción. En este trabajo se prepararon microemulsiones del tipo aceite en agua (O/W) y bicontinua (BC), utilizando precursores liposolubles e hidrosolubles. A continuación, se muestran las metodologías implementadas para la síntesis de microemulsión para la obtención del MOF de Zr UiO-66-F₄.

3.1.- Microemulsión Bicontinua Liposoluble (BC-OS-Zr2-1:1)

Se preparó una microemulsión bicontinua utilizando como precursor liposoluble Zr(IV) 2-etilhexanoato e isooctano como fase oleosa, Synperonic 91/5 como surfactante y agua Milli-Q® con ácido acético (modulador) como fase acuosa. También se preparó una microemulsión bicontinua con composición similar, conteniendo ácido tetrafluorotereftálico (4FTF) en la fase acuosa. La relación molar entre el Zr y el 4FTF se mantuvo en 1:1. La reacción se mantuvo en agitación durante 4 días. Tras la reacción, la mezcla se lavó 4 veces con isopropanol usando una centrífuga a 10,000 rpm/20 min. Después de los lavados, las fases se separaron por decantación y se dejaron secar a temperatura ambiente (25 °C).

3.2.- Microemulsión Bicontinua Hidrosoluble (BC-WS-Zr1B-1:1)

Se preparó una microemulsión bicontinua utilizando isooctano como fase oleosa, Synperonic 91/5 como surfactante, agua Milli-Q® como fase acuosa y como precursor hidrosoluble oxinitrato de Zirconio (IV). También se preparó una microemulsión bicontinua con composición similar, conteniendo ácido

tetrafluorotereftálico (4FTF) en la fase acuosa. Se utilizó ácido acético glacial concentrado como agente modulador. La relación molar entre el Zr y el 4FTF se mantuvo en 1:1. La reacción se mantuvo en agitación durante 4 días. Tras la reacción, la mezcla se lavó 4 veces con isopropanol usando una centrífuga a 10,000 rpm/20 min. Después de los lavados, las fases se separaron por decantación y se dejaron secar a temperatura ambiente (25 °C).

3.- Microemulsión Aceite-en-Agua (O/W) (O/W ZR-2EH 1:1)

Se preparó una microemulsión de tipo aceite en agua (O/W) usando Zr(IV) 2-etilhexanoato como precursor liposoluble e isooctano como fase oleosa, Synperonic 91/5 como surfactante, y agua desionizada con ácido acético concentrado (modulador) como fase acuosa. Esta microemulsión se hizo reaccionar con una solución acuosa que contenía ácido tetrafluorotereftálico (4FTF) disuelto en agua desionizada. La relación molar entre el Zr y el 4FTF se mantuvo en 1:1. La reacción se mantuvo en agitación durante 4 días. Tras la reacción, la mezcla se lavó 4 veces con isopropanol usando una centrífuga a 10,000 rpm/20 min. Después de los lavados, las fases se separaron por decantación y se dejaron secar a temperatura ambiente (25 °C).

4. Resultados y discusión

En la Figura 1 se muestra un conjunto de difractogramas de rayos X (XRD) donde se comprueba la obtención del MOF de Zr-UiO66-F₄, sintetizadas a diferentes condiciones utilizando microemulsiones. El difractograma del inciso a) corresponde al MOF obtenido por microemulsión BC usando el precursor liposoluble, en una relación molar 1:1 de Zr: 4FTF (BC-OS-Zr2-1:1). El inciso b) corresponde al MOF obtenido por microemulsión BC utilizando el precursor hidrosoluble, en una relación molar 1:1 de Zr: 4FTF (BC-WS-Zr-1B 1:1). El inciso c) corresponde al MOF obtenido por microemulsión O/W usando el precursor liposoluble en una relación molar 1:1 de Zr: 4FTF (O/W-Zr-2EH 1:1). El inciso d) corresponde al ligando 4-FTFA (ácido tetrafluorotereftálico) utilizado durante todos los experimentos de síntesis y el inciso e) corresponde al Zr₂N₂O₇, que es el precursor hidrosoluble usado para BC-WS-Zr-1B 1:1; el precursor liposoluble 2-etilhexanoato de zirconio no presenta reflexiones.

La comparación entre los patrones de difracción indica que en las tres primeras muestras (Fig. 1, a-c) se logró obtener el MOF de Zr-UiO66-F₄ pero con ligeras variaciones que podrían deberse a las diferentes condiciones de síntesis y composición. Estas diferencias se reflejan en un ligero corrimiento de las posiciones y las intensidades de los picos en sus respectivos patrones de XRD. Mientras que el ligando 4-FTFA y el compuesto Zr₂N₂O₇ muestran un patrón de difracción que confirma su naturaleza cristalina y diferente estructura en comparación con los materiales Zr-UiO66-F₄.

Este análisis sugiere que las condiciones de síntesis o las composiciones pueden afectar significativamente la estructura cristalina de los materiales derivados de Zr-UiO66-F₄. Los patrones de difracción indican diferencias en la estructura cristalina de las muestras sintetizadas bajo diferentes

condiciones de microemulsión, lo que sugiere que la naturaleza de la microemulsión influye en la formación del material Zr-UiO66-F_4 . Lo cual coincide con lo reportado por Chen y colaboradores ^[12] donde mencionan que los picos más importantes se observan alrededor de los ángulos de 7.35° y 8.5° , lo que indica diferencias en la estructura cristalina de los materiales analizados.

Podemos concluir que los MOF de Zr-UiO66-F_4 sintetizados en este trabajo muestran las reflexiones principales a 6° , 8.5° y 12.11° , mientras que para el MOF Zr-UiO66-F_4 calculado por Chen aparecen en 6° (plano 110, reo), 7.35° (plano 111, reo, fcu) y 8.5° (plano 200, reo, fcu). Por tanto, podemos resaltar que, en los materiales obtenidos en esta investigación, presentan una alta cantidad de defectos, es decir, presentan predominantemente la estructura reo, la cual es deficiente en clústeres de zirconia. De acuerdo con la literatura, el MOF UiO66 es un MOF prototipo para ingeniería de defectos ya que tolera muchos defectos en su estructura sin perder su estabilidad estructural.¹³ Los defectos en los MOFs pueden ser deseables ya que les confieren propiedades únicas e interesantes que pueden ser explotadas en las aplicaciones.

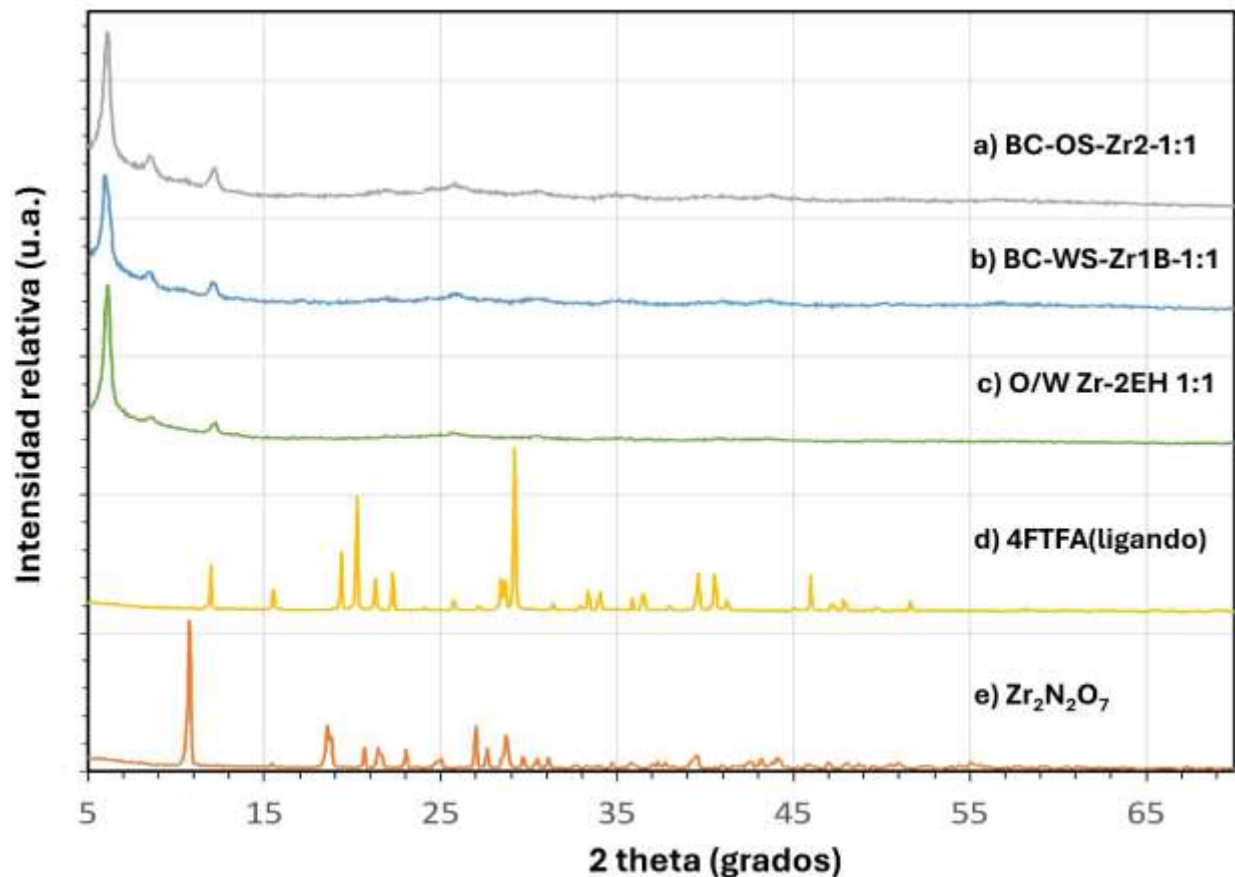


Figura 1. Difractograma de rayos X (XRD) correspondientes a diferentes muestras del MOF de Zr-UiO66-F_4 , sintetizadas usando diferentes condiciones por microemulsión.

La Figura 2 muestra las micrografías electrónicas de barrido obtenidas del MOF sintetizado por microemulsión bicontinua usando el precursor liposoluble de Zr, usando las condiciones especificadas en la metodología de BC-OS-Zr2-1:1, en las imágenes podemos observar la formación de agregados de partículas irregulares y laminares con tamaños del orden de micrómetros, los cuales probablemente estén formados por apilamientos de nano placas.

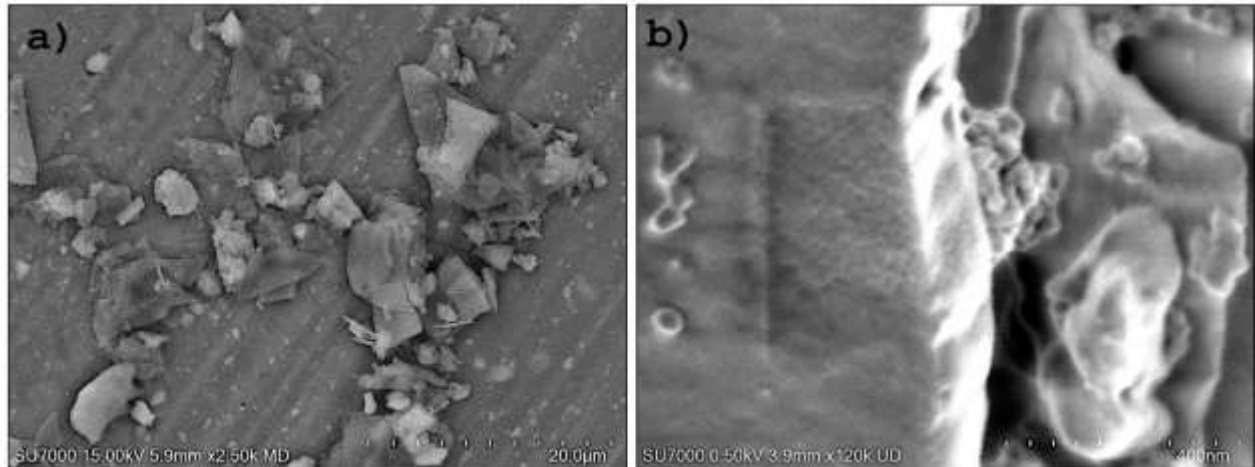


Figura 2 Micrografías electrónicas de barrido del MOF de Zr-UiO66-F₄ obtenido por ME- BC-OS-Zr2-1:1, a diferentes magnificaciones; a) 2,500x, b) 120,000x.

La Figura 3 muestra las micrografías obtenidas por SEM del MOF sintetizado con las condiciones de la microemulsión bicontinua utilizando el precursor hidrosoluble de Zr (BC-WS-Zr1B-1:1), en donde podemos observar la formación de superestructuras jerárquicas interconectadas, este tipo de morfología está compuesta por nanopartículas globulares de un tamaño promedio de $33.43 \text{ nm} \pm 7$, este tipo de morfología puede compararse con un collar de perlas enredado como se puede observar en la figura 3 inciso a-b).

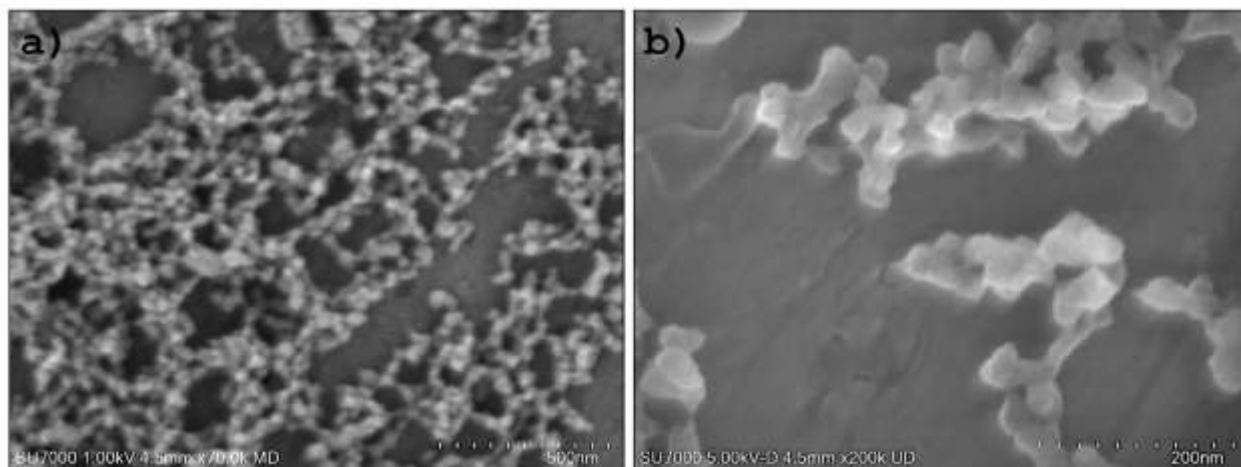


Figura 3. Micrografías electrónicas de barrido del MOF de Zr-Uio66-F₄ obtenido por ME-BC-WS-Zr1B-1:1, a diferentes magnificaciones; a) 70,000x, b) 200,000x.

La Figura 4 muestra las micrografías obtenidas por SEM del MOF sintetizado usando las condiciones de la microemulsión aceite-en-agua (O/W-Zr-2EH-1:1), esta metodología permitió la obtención de superestructuras jerárquicas de un tamaño promedio de 398 nm, las cuales están formadas por láminas o hojuelas apiladas, este tipo de estructuras puede semejar la formación de flores tipo campasúchil.

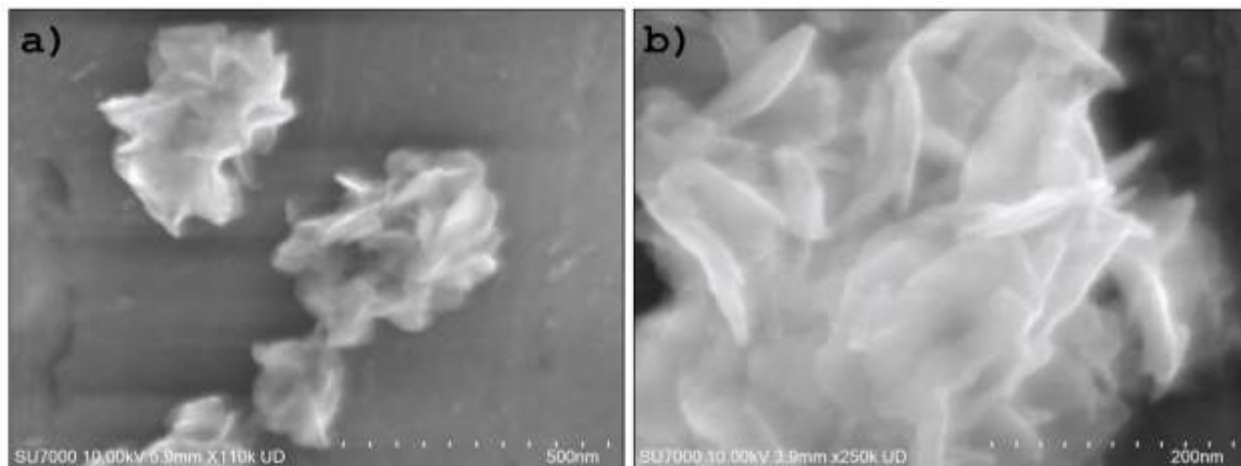


Figura 4. Micrografías electrónicas de barrido del MOF de Zr-Uio66-F₄ obtenido por ME-O/W Zr-2EH-1:1, a diferentes magnificaciones; a) 110,000x, b) 250,000x.

5. Conclusiones

Se logró obtener con éxito el MOF de Zr UiO-66-F₄ a través de la síntesis de diferentes tipos de microemulsiones; aceite en agua (O/W), bicontinua (BC) liposoluble e hidrosoluble. El uso de diferentes tipos de microemulsión nos permitió la obtención de superestructuras jerárquicas interconectadas a través de semiesferas de un tamaño promedio de 33.4 nm y de superestructuras tipo flor observadas mediante SEM. Así mismo se comprobó la formación del MOF de Zr UiO-66-F₄ mostrando las reflexiones principales a 6°, 8.5° y 12.11° por XRD, lo cual sugiere que predomina la estructura reo, con alto contenido de defectos. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran un gran potencial para la formación de MOFs para futuras aplicaciones en catálisis, detección, adsorción de gases, o almacenamiento de energía. En especial estos MOFs se utilizarán para absorber sustancias perfluoro y polifluoroalquiladas (PFAS) persistentes en el ambiente y además implementarlos como sustratos SERS para mejorar la detección de PFAS.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto financiado por CIMAV (Proyectos Internos 2024, PI-2024-02); y por CONAHCYT (Convocatorias INFR-2015-01 (255347), e INFR-2019-01 (301639)). Emilene Y. Ugalde-Salas agradece a CONAHCYT por la beca de maestría (1319039); M. Edith Navarro-Segura agradece a CONAHCYT por la beca posdoctoral (779264).

6. Bibliografía

- [1] Ye, R., Ni, M., Xu, Y., Chen, H., & Li, S. (2018). Synthesis of Zn-based metal–organic frameworks in ionic liquid microemulsions at room temperature. *RSC Advances*, 8, 26237 - 26242.
- [2] Kreno, L. E., Leong, K., Farha, O. K., Allendorf, M., van Duyne, R. P., & Hupp, J. T. (2012). Metal-organic framework materials as chemical sensors. In *Chemical Reviews* (Vol. 112, Issue 2, pp. 1105–1125).
- [3] Férey, G., Mellot-Draznieks, C., Serre, C., Millange, F., Surblé, S., & Dutour, J. (2005). "A hybrid solid with giant pores prepared by a combination of targeted chemistry, simulation, and powder diffraction." *Angewandte Chemie International Edition*, 44(21), 3255-3259.
- [4] Kim, M., Cahill, J. F., Su, Y., Prather, K. A., & Cohen, S. M. (2012). "Postsynthetic ligand exchange as a route to functionalization of 'inert' metal–organic frameworks." *Chemical Science*, 3(1), 126-130.
- [5] Nugent, P., Belmabkhout, Y., Burd, S. D., Cairns, A. J., Luebke, R., Forrest, K., Pham, T., Ma, S., Space, B., Wojtas, L., & Eddaoudi, M. (2013). "Porous materials with optimal adsorption thermodynamics and kinetics for CO₂ separation." *Nature*, 495(7439), 80-84.
- [6] Ghobadi, T. G., Kashan, A. A., & Isfahani, T. D. (2020). "Synthesis of UiO-66 MOF in a microemulsion system: Investigating the effect of the synthesis parameters." *Materials Today Communications*, 22, 100759.

- [7] Nugent, P., Belmabkhout, Y., Burd, S. D., Cairns, A. J., Luebke, R., Forrest, K., Pham, T., Ma, S., Space, B., Wojtas, L., & Eddaoudi, M. (2013). "Porous materials with optimal adsorption thermodynamics and kinetics for CO₂ separation." *Nature*, 495(7439), 83-84.
- [8] Ennis, C., Tay, A. C. Y., Falconer, J. L., Lee, S. J., & Meledandri, C. J. (2021). Nanoscale Cu(II) MOFs Formed via Microemulsion: Vibrational Mode Characterization Performed using a Combined FTIR, Synchrotron Far-IR, and Periodic DFT Approach. *Journal of Physical Chemistry C*, 125(37), 20426–20438.
- [9] Zhuoxue, Li., Yunlei, Shi., Yimian, Ding., Da-fu, Xiong., Zhiyong, Lu., Huiyong, Wang., Jikuan, Qiu., Xiaopeng, Xuan., Jianji, Wang. (2024). Zr-Based MOF-Stabilized CO₂-Responsive Pickering Emulsions for Efficient Reduction of Nitroarenes *Langmuir*.
- [10] Ranfeng, Ye., Min, Ni., Yuanyuan, Xu., Hao, Chen., Shengqing, Li. (2018). Synthesis of Zn-based metal–organic frameworks in ionic liquid microemulsions at room temperature. *RSC Advances*, 8(46):26237-26242.
- [11] Gagnon, K. J., Perry, H. P., & Clearfield, A. (2012). Conventional and unconventional metal-organic frameworks based on phosphonate ligands: MOFs and UMOFs. In *Chemical Reviews* (Vol. 112, Issue 2, pp. 1034–1054).
- [12] Z. Chen *et al.*, "Scalable, room temperature, and water-based synthesis of functionalized zirconium-based metal-organic frameworks for toxic chemical removal," *CrystEngComm*, vol. 21, no. 14, pp. 2409–2415, 2019.

DISEÑO Y SÍNTESIS DE PUNTOS CUÁNTICOS DE ZNO-TEOFILINA PARA LA LIBERACIÓN DE UN NANOSISTEMA DIRIGIDO A LA PROTECCIÓN HEPÁTICA Y SU EVALUACIÓN EN RATAS.

Ochoa Vera, OOV,¹ Jardínez Vera, ACJV,¹ Fernández Martínez, TEFM,²

¹ Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Laboratorio de modelado y simulación computacional en nanomedicina, Mexico.

²Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Medicina, Mexico..

osvaldoov88@gmail.com

aldo_jardinez@uaeh.edu.mx

1. Resumen

Los medicamentos pueden prevenir o curar enfermedades, pero también pueden causar efectos secundarios por su uso prolongado, lo que complica el tratamiento de enfermedades como la esteatohepatitis no alcohólica (NASH). Aunque se recomienda un cambio en la dieta como tratamiento, no siempre es suficiente para controlar esta condición.

Este proyecto busca crear una sinergia entre ZnO, con propiedades antimicrobianas, antioxidantes y buena biocompatibilidad, y la teofilina, que ha demostrado efectos hepatoprotectores. El objetivo es desarrollar un nanosistema utilizando puntos cuánticos de ZnO funcionalizados con teofilina. Primero, sintetizaron y caracterizaron los puntos cuánticos de ZnO y el nanosistema usando técnicas como UV-Vis, FTIR, DLS y SEM. Finalmente, se evaluó el efecto hepatoprotector del nanosistema ZnO-teofilina en ratas con NASH inducida por CCl₄, determinando marcadores bioquímicos.

2. Introducción

Las Enfermedades hepáticas ocupan el 4to lugar entre las causas principales de mortalidad nacional y mundial. En África y Asia son especialmente provocadas por virus, así como en Europa y América por consumo de alcohol ¹⁷⁸, también ocupan el 2do lugar entre las causas de muerte principales en edad productiva, es decir, entre 25 y 64 años. Debido a esto es importante realizar investigación acerca de nuevos tratamientos con funciones hepatoprotectoras. Además, existen muy pocos tratamientos realmente efectivos para controlar el daño hepático, aunado a que el tratamiento puede ser muy costoso a largo plazo e incluso el trasplante de hígado es difícil de costear y conseguir ¹⁵⁴.

El uso de NP's en la medicina ha crecido exponencialmente en los últimos años debido a sus propiedades versátiles, así como su potencial en aplicaciones terapéuticas y diagnósticas. Actualmente un alto porcentaje de investigaciones en nanomedicina se centra en la mejora de la estabilidad, biodisponibilidad y liberación controlada de fármacos. En muchos países, tanto desarrollados como en vías de desarrollo, la incorporación de nanopartículas en la investigación biomédica está siendo cada vez más competitiva, reflejando la promesa que estos materiales tienen capacidad para revolucionar el tratamiento de enfermedades. A pesar de su potencial, una gran cantidad de nanopartículas diseñadas y sintetizadas aún requieren estudios exhaustivos para validar científicamente sus efectos y seguridad, subrayando la importancia de continuar con la investigación y desarrollo en este campo emergente.

Por otro lado, el ZnO, que es una sal metálica presente en forma de zincita en la naturaleza, se ha convertido en un tema de estudio frecuente debido a sus variadas propiedades biocompatibles, antibacterianas, antifúngicas¹⁸ y angiogénicas¹⁹. Sus nanopartículas se han investigado como una alternativa para combatir Alzheimer²⁰, diabetes, problemas cardíacos²¹, y como hepatoprotector²². En específico, el ion Zn²⁺, que resultaría de la disociación del ZnO, está involucrado en el metabolismo

de lípidos, ayudando a controlar la síntesis y degradación de los ácidos grasos²³, lo cual es un factor importante al tratar daño hepático agudo, así como sus efectos inmunomoduladores y antifibróticos ya reportados en cirrosis²⁶. Por otro lado, la familia de las metilxantinas no solo ha demostrado efectos benéficos al tratar el asma y otras afecciones respiratorias, sino también en algunos estudios realizados enfocados en hepatopatías²⁷; la teofilina pertenece a esa familia y, aunque poco estudiada, muestra resultados prometedores en tratar afecciones relacionadas al daño hepático²⁸, debido a sus propiedades antiinflamatorias y antioxidantes, las cuales son capaces de reducir significativamente la acumulación de grasa en el hígado, así como reducir la sensibilidad a la insulina²⁸. Sin embargo, la mayoría de los estudios han evaluado los efectos biológicos del ZnO y teofilina por separado, dejando de lado aquellos posibles beneficios de la interacción de estos dos.

Es una prioridad encontrar tratamientos adecuados para mejorar e idealmente revertir enfermedades hepáticas de ahí la importancia del estudio de los nanosistemas con el fin de obtener una alternativa terapéutica más para estas enfermedades.

Es por esto que en este trabajo estudiaremos la sinergia de estos dos compuestos mediante la evaluación hepatoprotectora del nanosistema en modelos de daño agudo experimental inducido por CCl₄ en rata.

3. Condiciones experimentales

3.1 Diseño Experimental

Se realizó una síntesis de puntos cuánticos de ZnO mediante el método de precipitación química. Donde se utilizaron dos soluciones etanólicas, la solución 1 de acetato de zinc como agente precursor donante de iones Zn²⁺ y una solución 2 de hidróxido de litio como agente reductor y mediante una adición de ambas soluciones por goteo se la solución 3 que contenga la molécula ZnO. Los parámetros como concentraciones, tiempo, agitaciones y temperatura fueron controlados para intentar tener un control más preciso del crecimiento y tamaño de partícula. Posteriormente, una solución 4 de ácido cítrico (AC) fue preparada, esto con la intención de generar un recubrimiento de las moléculas de ZnO, una vez adicionada la solución 4 a la solución 3 se procede a realizar la recolección del complejo ZnO@AC mediante centrifugado y secado, para posteriormente mediante formar una relación sólido-sólido equimolar entre el complejo y la teofilina.

3.2 Caracterización

Se implementaron diversas técnicas de caracterización para evaluar las propiedades del ZnO y del nanosistema ZnO-teofilina. A continuación, se describen las técnicas utilizadas:

1. **Espectroscopía UV-Vis:** Se realizó un estudio UV-Vis para caracterizar el ZnO, donde se analizó la absorción de luz en función de la longitud de onda. Esta técnica permitió determinar la banda de absorción característica del ZnO y su correlación con el tamaño de las partículas.
2. **Fotoluminiscencia (PL):** Se evaluó la fotoluminiscencia de la solución de puntos cuánticos (QD's) de ZnO. El color emitido por las soluciones fue registrado y se asoció al tamaño de las partículas, permitiendo así una estimación indirecta del tamaño de los QD's sintetizados.
3. **Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR):** Se llevó a cabo un estudio FT-IR para evaluar el acoplamiento de los compuestos y la correcta formación del nanosistema ZnO-teofilina. Esta técnica permitió identificar los grupos funcionales presentes y verificar la interacción entre la teofilina y el ZnO.
4. **Dispersión de Luz Dinámica (DLS):** Se utilizó DLS para analizar el tamaño y la distribución de las partículas en el nanosistema. Esta técnica proporcionó información sobre el tamaño hidrodinámico y la estabilidad coloidal del nanosistema en solución.
5. **Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):** Se empleó SEM para caracterizar la morfología y el tamaño de las partículas tanto del ZnO como del nanosistema ZnO-teofilina. Las imágenes obtenidas permitieron una visualización directa de las estructuras sintetizadas, confirmando la formación de partículas en la escala nanométrica y su correcta funcionalización.

3.3 Evaluación In-Vivo

Se utilizaron ratas Wistar normo-peso y su comportamiento, así como sus signos vitales fueron monitoreados por un periodo de dos días. El nanosistema, el ZnO y la teofilina fueron administradas a los animales como se observa en la figura 1. Fueron un total de 9 grupos con un n=6 cada uno. Después de 38 horas las ratas fueron sacrificadas vía exanguinación por punción cardíaca bajo anestesia, para la posterior determinación de marcadores bioquímicos como GGTP, ALT y bilirrubinas en plasma y peroxidación lipídica, proteínas, glucógeno y catalasa en hígado.

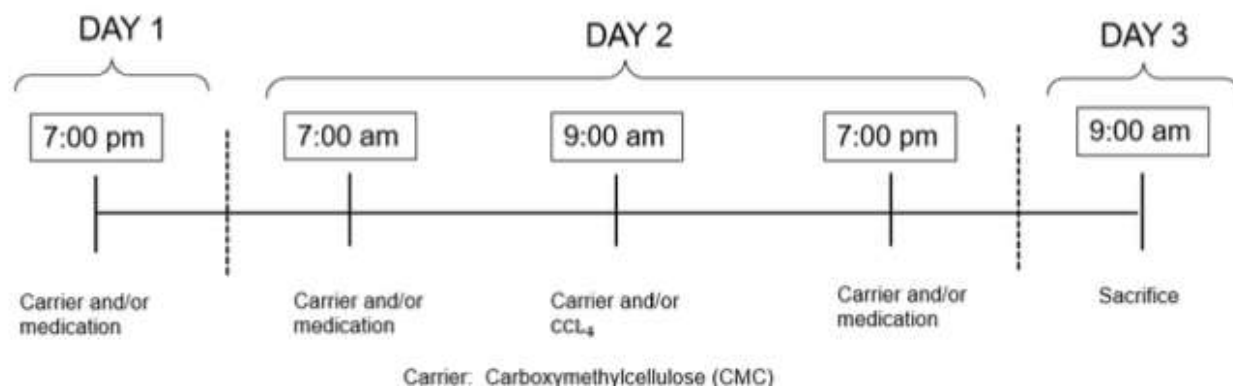


Figura 1. Esquema de tratamiento en biomodelos

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización

Espectroscopía UV-Vis: Demostró una banda de absorción dentro del pico característico de 300-320 nm del ZnO, lo que nos confirma una correcta síntesis.

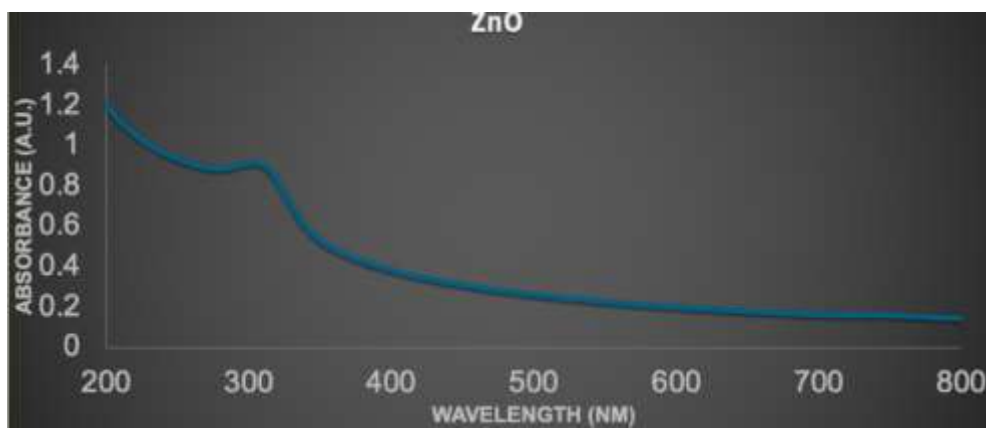


Figura 2. Espectro Uv-Vis del ZnO

Fotoluminiscencia (PL): La fotoluminiscencia de la solución al ser sometida a luz UV nos mostró una emisión de verde y azul, las cuales podemos asociar con un tamaño de 5-7nm y 3-5nm repectivamente.

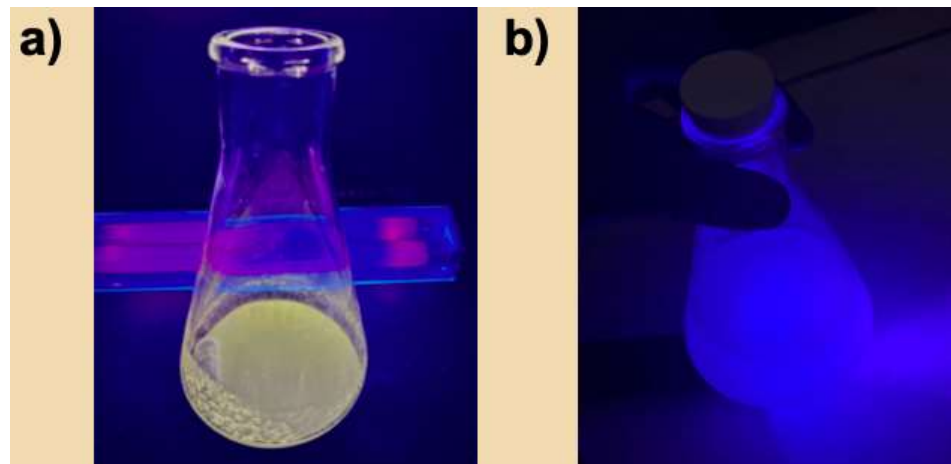


Figura 3. Fotoluminiscencia del ZnO

Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR): Demostró la curva característica del enlace Zn-O, en el espectro amarillo del complejo ZnO@AC, podemos ver una atenuación en los grupos -OH, esto debido al recubrimiento de CA, también la presencia de los grupos -COOH en la curva verde del nanosistema se ve disminuida y la presencia del grupo C=O aumentada. Esto por el acoplamiento de la teofilina a la superficie.

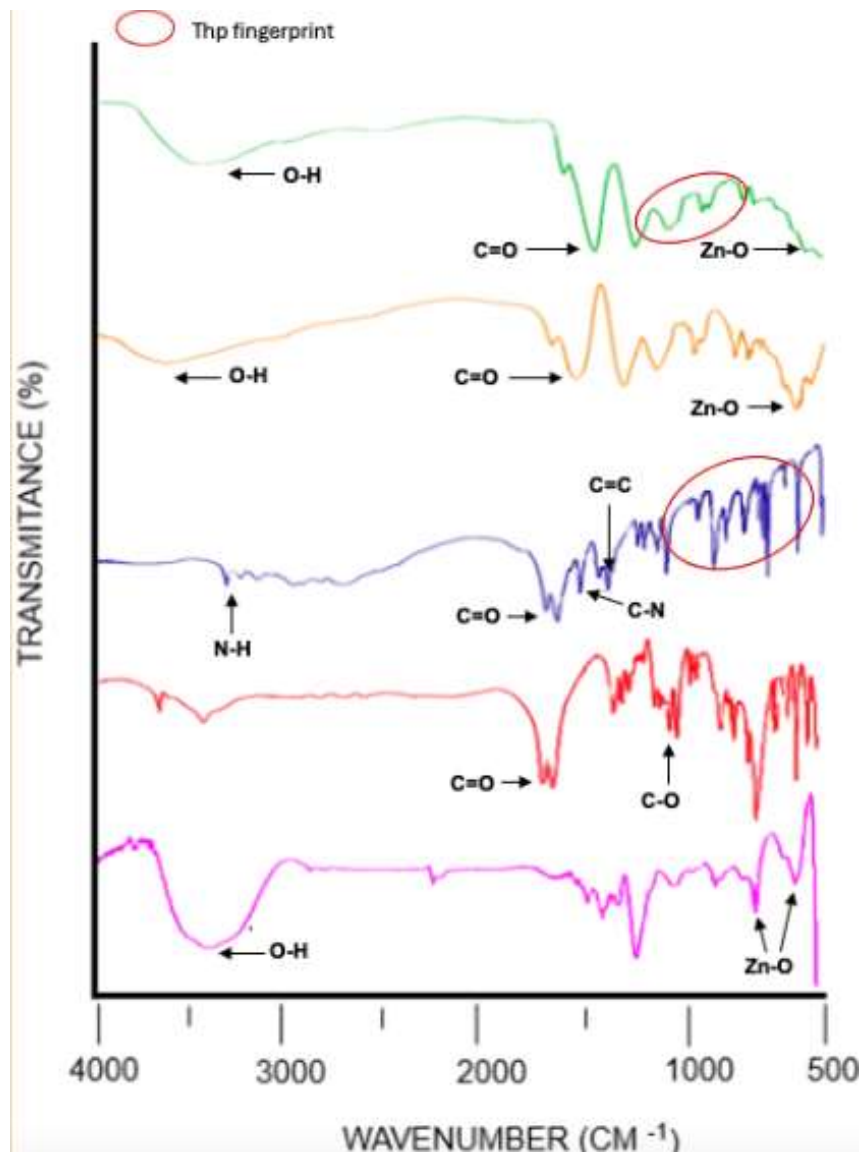


Figura 4. FT-IR que muestra acoplamiento del nanosistema

Dispersión de Luz Dinámica (DLS): Demostró una distribución normal y un tamaño promedio de partícula de 375nm.

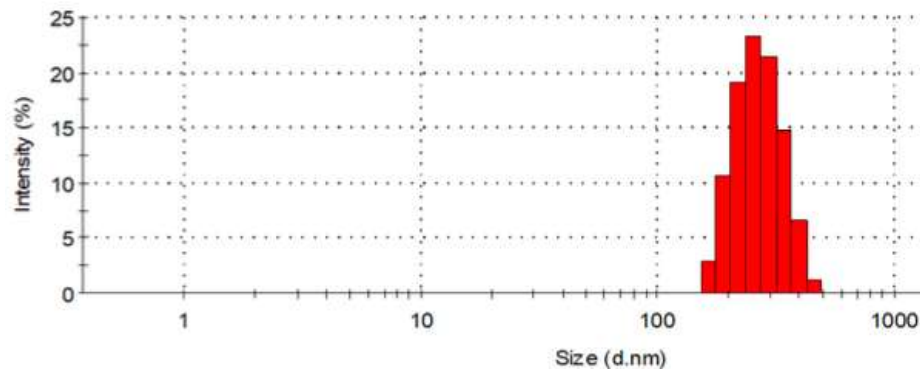


Figura 5. DLS del nanosistema

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM): Se muestra que el ZnO tiene un tamaño promedio de 15 micrometros despues de su aglomeración, asi como su morfología.



Figura 6. SEM del ZnO

5. Conclusiones

6. Bibliografía

Monitorización del proceso de evaporación de líquidos solventes empleando un sensor de fibra óptica

Martínez-Gutiérrez, D.¹, Guadarrama-Santana, A.², Sandoval-Romero G.E.²

¹Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

²Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM, México.

daniel.martinez@ingenieria.unam.edu, asur.guadarrama@icat.unam.mx,
eduardo.sandoval@icat.unam.mx

1. Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de un sensor de intensidad, construido con fibra óptica, que se ha empleado para monitorizar el proceso de evaporación de líquidos solventes mediante el cambio del índice de refracción efectivo que ocurre entre el revestimiento y la sustancia. Cada sustancia que ha sido empleada en la caracterización del sensor, produce una señal que se distingue por su forma y tiempo de evaporación en función de la intensidad óptica transmitida.

2. Introducción

De acuerdo a Brutin y Starov ^[1], el trabajo desarrollado en la descripción de la forma de una gota, su superficie de contacto, forma, mojado y dinámica del proceso de evaporación sobre un sustrato, se ha incrementado en un factor de 10 durante los últimos 50 años (hasta 2018), debido a la importancia que tienen en diversas aplicaciones del ámbito industrial y en sistemas biológicos. Kokorin, Nazarov y Serov ^[2] (2021) afirman que la experimentación sigue siendo el método principal de estudio para el proceso de evaporación de una gota, especialmente si su composición es compleja. Una de las técnicas preferidas por los investigadores para recopilar información hace uso de mediciones ópticas empleando equipos de fotografía, video, termografía y fuentes láser. Estos métodos presentan el inconveniente asociado a la complejidad del procesamiento de datos, por lo que recientemente se han propuesto métodos de medición eléctricos, que requieren en menor medida de laboriosos métodos de procesamiento, dado que registran una señal eléctrica en función del parámetro físico que se estudia.

En el laboratorio de Sensores Eléctricos del ICAT, se ha hecho el registro del proceso de evaporación de líquidos solventes empleando sensores capacitivos con electrodos coplanarios lineales de alta resolución ^[3]. Los resultados que se han obtenido alientan a seguir empleando esta

técnica y combinarla con alguna otra de naturaleza óptica. Para este propósito, junto con el laboratorio de Sensores de Fibra Óptica del ICAT, se decidió construir un sensor basado en una fibra óptica que pudiera monitorizar el proceso de evaporación de una gota de líquido solvente empleando una superficie sensitiva similar a la de un electrodo capacitivo.

El sensor se construyó intercalando una sección de fibra óptica monomodo (*SMF*) en una fibra óptica multimodo (*MMF*) [figura 1]. El arreglo se denomina *MM-SM-MM* y la región sensitiva es el segmento de fibra monomodo [4]. Debido a la diferencia que hay entre los diámetros de los núcleos de las fibras en este tipo de empalmes, se considera que los modos más probables que se transmitan son los modos centrales de la fibra multimodo, que tienen un ángulo de incidencia pequeño con respecto al eje de la fibra (LP_{01} y LP_{02}). El resto de la luz se propaga a través del revestimiento y se considera que ciertos modos se transmiten debido a la diferencia que hay entre el índice de refracción del revestimiento y el medio externo, el cual será la gota que se deposita. Por tanto, el índice efectivo de refracción se puede calcular empleando las ecuaciones de los coeficientes de Fresnel, o bien mediante una caracterización experimental. Intercalando un segmento de entre 15 y 20 [mm] de longitud de la fibra *SMF*, la intensidad de luz transmitida se reduce aproximadamente a la mitad cuando el medio externo es aire. Si se deposita un medio (gotas de aproximadamente $20 [\mu L]^1$) de líquidos solventes (acetona, isopropanol), la disminución de intensidad transmitida disminuye aún más y es posible registrar la forma de la señal producida al evaporar la sustancia. Con ello, podría determinarse el tiempo de evaporación y probablemente la rapidez con la que ocurre.

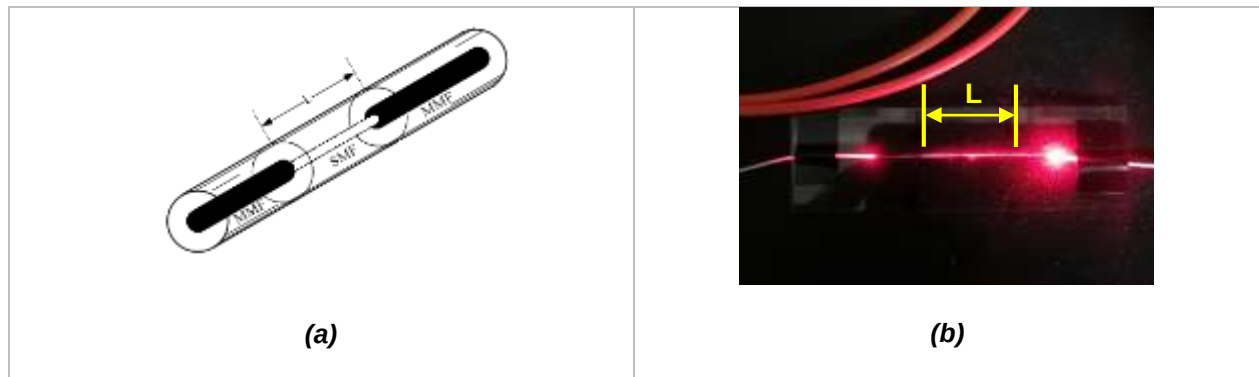


Figura 1. Sensor de fibra óptica *MM-SM-MM*: (a) Esquema y (b) Implementación física.

3. Condiciones experimentales

En la implementación del sensor, se empleó una fibra multimodo (MM) cuyo núcleo es de $62.5 [\mu m]$ de diámetro y $125 [\mu m]$ de diámetro total (se le conoce como *patch cable* y se emplea para realizar interconexiones en equipo de comunicaciones). El segmento de fibra monomodo (SM) tiene un diámetro de núcleo de $9 [\mu m]$ y un diámetro total de $125 [\mu m]$ (tipo SMF-28). La construcción del

arreglo no requiere de alguna preparación especial de las fibras; simplemente hay que realizar los cortes y empalmar. Para darle soporte a la estructura MM-SM-MM, se fijó sobre un portaobjetos liso de 25×75 [mm], y de esta manera se minimiza el riesgo de fractura en las zonas de los empalmes [figura 1 (b)].

Para caracterizar el dispositivo, se empleó el arreglo experimental mostrado en la figura 2. La fuente de luz es un láser de la marca Thorlabs modelo S1FC1550 cuya longitud de onda es $\lambda = 1550$ [nm] (Fabry-Perot) y cuyo espectro se muestra en la figura 3. El fotodetector empleado es el modelo S155C de Thorlabs (intervalo de medición: $\lambda = 800$ a 1700 [nm] y $P = 1$ [nW] a 20 [mW]), resolución de 100 [pW] y cuenta con adaptador FC. La interfaz es el modelo USB PM100USB del mismo fabricante. Para realizar la función de *datalogger*, se utilizó el software Thorlabs Optical Power Monitor versión 3.1.3778.562, la frecuencia de actualización es de 300 [Hz]. Previamente, se probó la estabilidad de la fuente láser para determinar la disminución en la transmisión de la luz al pasar por el dispositivo. El procedimiento para realizarlo fue:

1. Activar la fuente láser y dejar en operación por 15 minutos sin activar la salida. Esto con el propósito de que el equipo alcance su temperatura óptima de operación.
2. Ajustar la potencia de salida en la fuente a 1 mW. Conectar la fibra óptica al fotodetector.
3. Ajustar el tiempo de captura en el datalogger a 1 hora y 30 minutos, y el tiempo entre muestras a segundo.
4. Activar la salida de la fuente láser y registrar la lectura de la potencia detectada por el fotodetector.

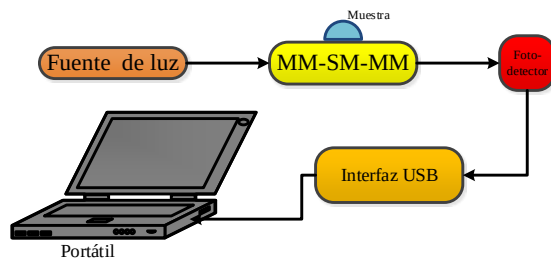


FIGURA 2. ARREGLO EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAR EL SENSOR MM-SM-MM.

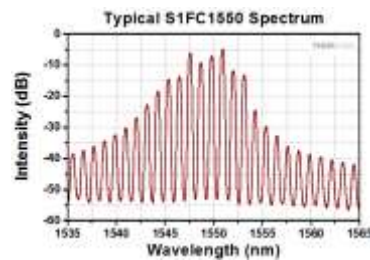


FIGURA 3. ESPECTRO DEL HAZ LÁSER EMPLEADO (TOMADO DE [HTTPS://WWW.THORLABS.COM/NEWGROUPEPAGE9.CFM?OBJECTGROUP_ID=5760&PN=S1FC1550PM](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5760&pn=s1fc1550pm))

En la figura 4 se muestran los resultados obtenidos de esta caracterización. El nivel de ruido base del sensor MM-SM-MM se puede determinar empleando agua o un solvente (alcohol o acetona). Para

ello, de acuerdo con los resultados que se informan en trabajos previos, se eligió realizar una medición de la potencia transmitida cuando el sensor está rodeado por aire durante un período de 10 minutos (previamente habiendo dejado encendido la fuente láser para alcanzar su temperatura de operación). En las especificaciones del láser, se menciona que la estabilidad de 24 h es de ± 0.1 [dB], es decir, que según esta especificación, la potencia del láser se espera que fluctúe alrededor del 0.2% del valor esperado. Es decir, a 1 [mW] de potencia de salida (0 [dBm]), se espera una potencia de 0.25 [mW] (-6 [dBm]) – debido a que el sensor opera con pérdidas – y entonces deberá existir una variación de aproximadamente [5 μ W]. Como esta variación es completamente aleatoria, entonces debemos esperar que el valor medido correcto se encuentre en una franja de ± 5 [μ W] (en el peor caso). En la figura 5(a) se muestra una gráfica que se obtuvo al realizar esta prueba. Como se puede apreciar en la figura 5(b), la potencia transmitida alcanza un valor pico de 217.5 [μ W] y un valor mínimo de 216.2 [μ W]. Esto nos da una franja de 2 [μ W] aproximadamente, lo cual está de acuerdo con la especificación de la fuente láser.

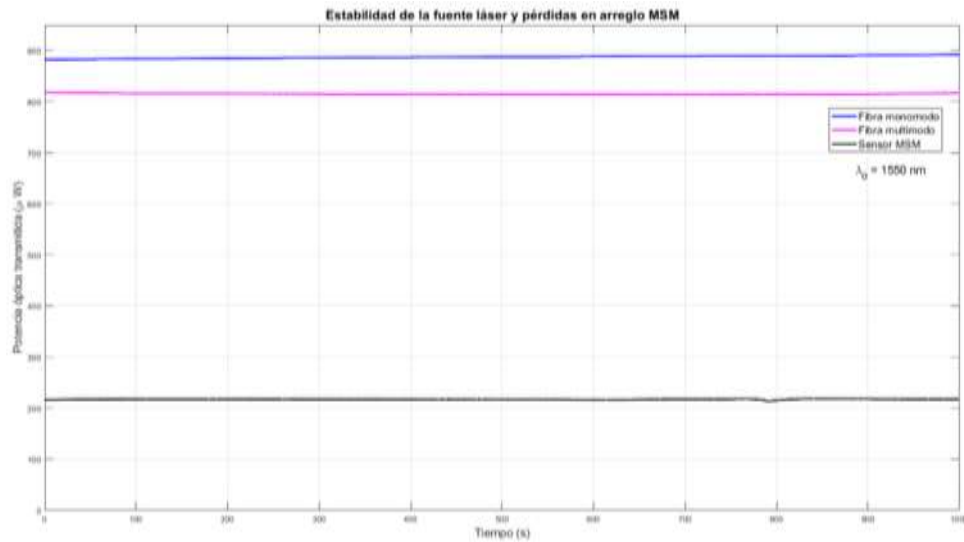


Figura 4. Estabilidad de la fuente láser y pérdidas por transmisión en la fibra óptica y el sensor MM-SM-MM.

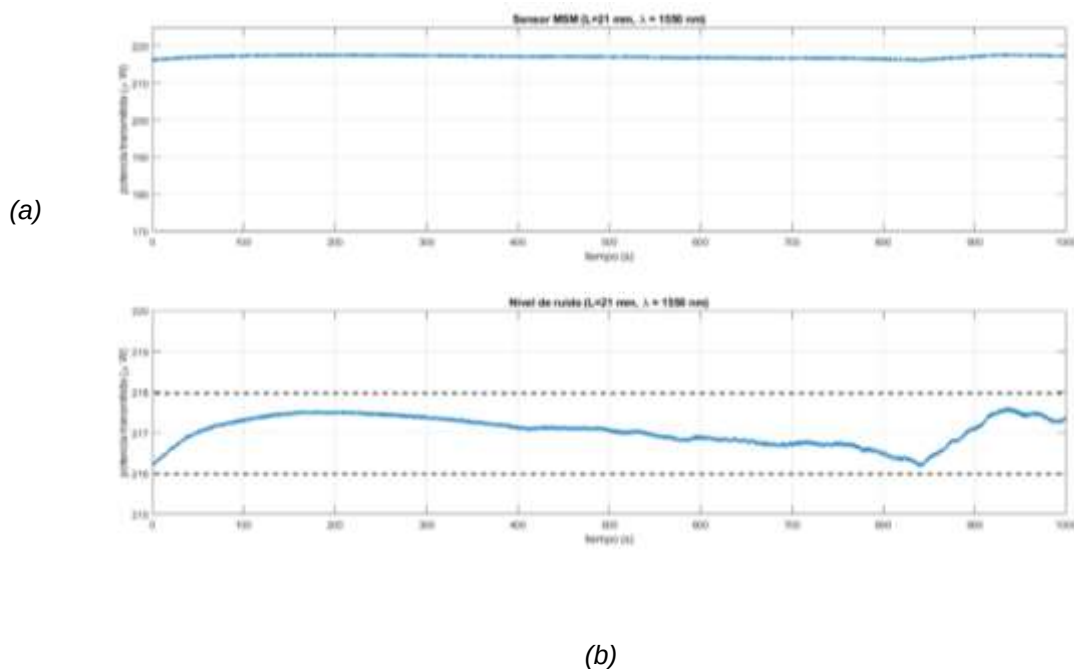


Figura 5. (a) Señal registrada del funcionamiento del sensor *MM-SM-MM* rodeado por aire durante 15 minutos y (b) Valores máximo y mínimo de la señal registrada.

4. Resultados y discusión

El desempeño para la detección de solventes se determinó depositando 20 μL de alcohol isopropílico y registrando la señal resultante. Se eligió un sensor con $L = 21$ [mm], debido a que es fácilmente reproducible su construcción con los elementos y herramientas con las que cuenta el laboratorio. La figura 6 muestra la forma de la señal registrada durante el proceso de evaporación. En 6(a), se observa la potencia óptica transmitida cuando se depositan dos gotas de isopropanol sucesivamente. La primera de ellas produce una disminución de aproximadamente 18 μW en la potencia óptica transmitida. Después de que se ha evaporado completamente (alrededor de 30 [s]), se recupera el nivel inicial de luz transmitida y aproximadamente 240 [s] después se deposita nuevamente una gota y se observa una caída similar en la potencia óptica transmitida, así como el tiempo de evaporación. Se observa que la forma de la señal es muy similar en los dos ensayos realizados. Se pueden explicar las ligeras variaciones que se observan en los patrones de evaporación debido que la forma en que se distribuye la muestra sobre la fibra y el sustrato no es idéntica. En 6(b), a manera de comparación, la señal registrada para cada gota, se han graficado superpuestas con el fin de determinar un patrón de evaporación y comparar los tiempos en que cada gota ha evaporado. Se observa que al depositar la gota, la caída en la transmisión de la luz es similar, sólo que

en el ensayo 2, la curva que corresponde a la evaporación del alcohol, presenta un cambio abrupto que puede deberse a que parte de la muestra se esparció sobre el sustrato, es decir, no tenía la misma cantidad de solvente sobre la fibra. El tiempo que tarda en evaporarse ambas gotas es el mismo (aproximadamente 30 [s])

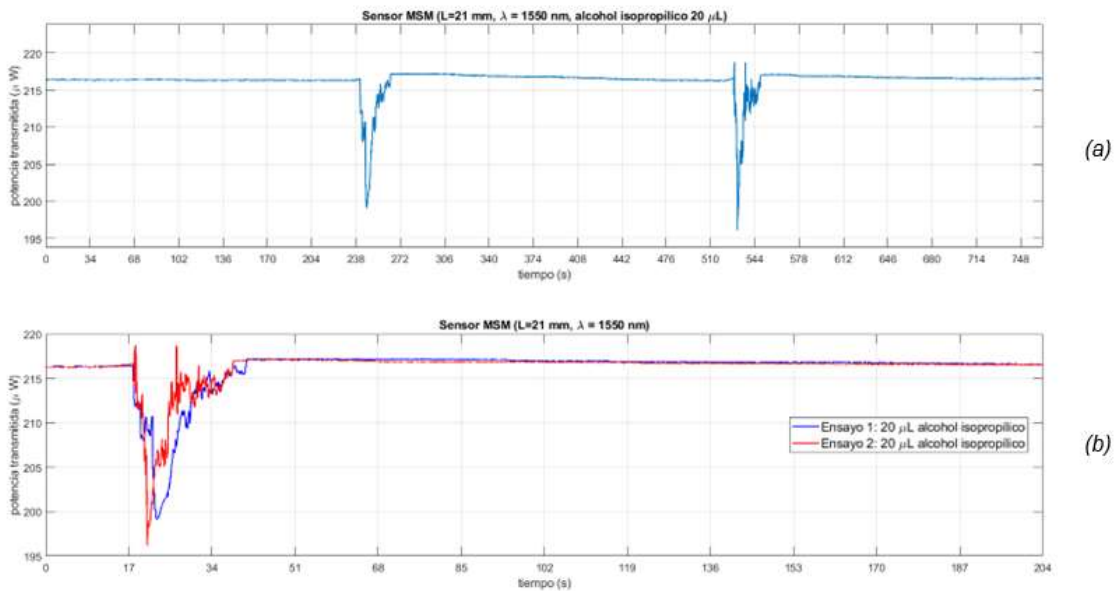


Figura 6. Gráfica de la respuesta del sensor MM-SM-MM cuando se le coloca una muestra de 20 μ L] de alcohol isopropílico. (a) Dos muestras depositadas sucesivamente y (b) Comparación de la señal registrada durante el proceso de evaporación de cada gota.

Posterior a estos primeros ensayos, se realizó la caracterización del sensor MM-SM-MM empleando cuatro líquidos solventes: metanol, etanol, isopropanol y acetona. Para ello no se depositaron gotas, sino se sumergió la zona sensitiva en dichos líquidos y se registró la potencia óptica transmitida. Como la disminución en la potencia transmitida se debe al cambio en el índice de refracción de la muestra, se construyó la gráfica de la figura 7. Se repitió 5 veces cada prueba para determinar la desviación estándar de la lectura promedio registrada para cada sustancia. Se observa que la mayor desviación se tiene al sumergir el sensor en etanol.

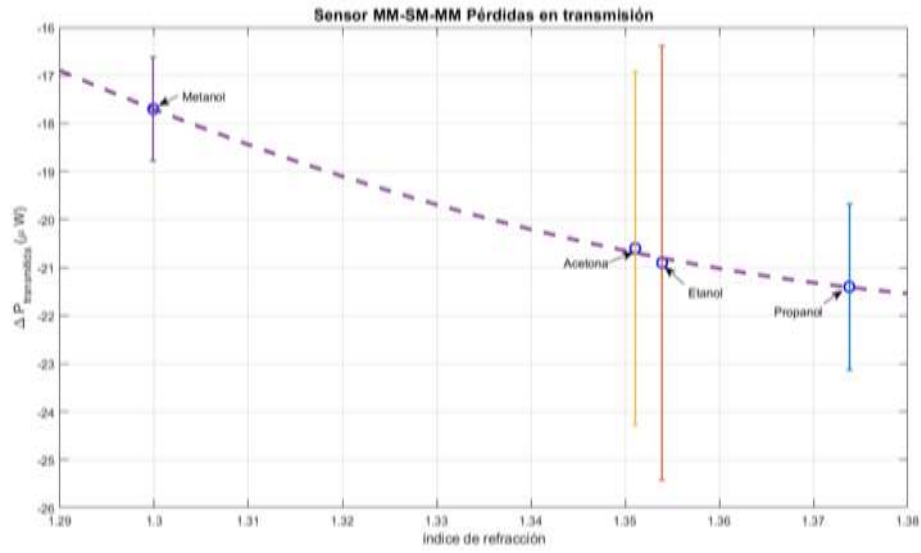


Figura 7. Caracterización estática del sensor MM-SM-MM empleando solventes.

La línea de mejor ajusta es:

$$P_{transmitida} = 363.6 n^2 - 1022.4 n + 696.89$$

utilizando esta expresión, se puede evaluar la sensibilidad estática del sensor:

$$\frac{\partial P_{transmitida}}{\partial n} = 727.2n - 1022.4 \mu\text{W}/\text{uir}.$$

Como se realizó previamente, se colocó una muestra de 20 [μL] de cada sustancia y se registró la señal del sensor mientras ocurre el proceso de evaporación. Las gráficas de cada solvente se muestran en la figura 8.

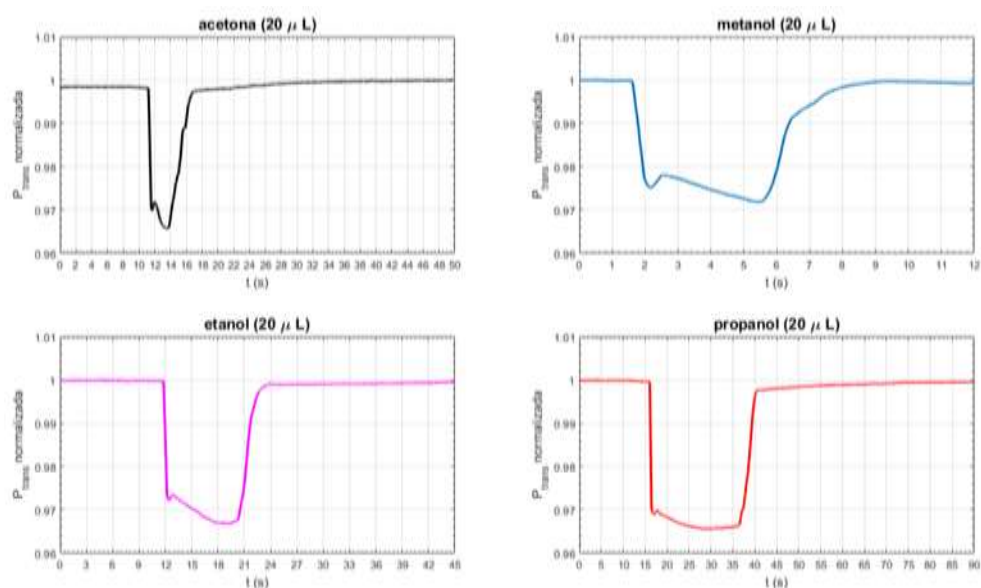


Figura 8. Señales detectadas durante la evaporación de 20 μL de diversos solventes.

En este caso, se observan diferentes patrones de las curvas, asociados a la dinámica de evaporación de cada sustancia, la cual también se ve influenciada por las condiciones ambientales al momento de realizar cada ensayo. Para suavizar las curvas, se empleó un filtro de promedio móvil, el cual promedia 100 muestras de datos crudos y se han normalizado con respecto a la potencia óptica transmitida en ausencia de la muestra. La acetona, se usó para evaluar la rapidez de respuesta del sensor, ya que es el solvente que presenta una tasa de evaporación mayor. Los 20 μL se evaporaron en aproximadamente 6 [s]. El metanol, es el alcohol que tiene la tasa de evaporación más rápida, pues se evaporan los 20 μL en 7 [s]. Le sigue el etanol, con 12 [s] y finalmente el isopropílico evapora en 30 [s].

5. Conclusiones

Con este trabajo, hemos mostrado que el sensor por diferencia en el diámetro de núcleo (MM-SM-MM) es capaz de detectar índices de refracción en el intervalo de 1.2999 a 1.3666 ($\lambda = 1550$ [nm]) a través de pequeños cambios en la potencia óptica transmitida. Posee una rapidez de respuesta que le permite registrar el proceso de evaporación de alcoholes (metanol, etanol e isopropanol), distinguiéndose claramente por la forma de la señal. De acuerdo a las pruebas realizadas, no hay diferencia significativa en la respuesta del sensor al variar la longitud (L) de la fibra monomodal, por lo que ligeras diferencias en dicha longitud no afectan su comportamiento y aseguran su reproducibilidad al

ensamblarse con las herramientas comunes con la que se cuentan en casi cualquier laboratorio (cortadora y empalmadora de fibra óptica). Queda por trabajo a futuro, mejorar la magnitud de la señal de respuesta, aunque actualmente puede ser amplificada electrónicamente.

6. Bibliografía

1. Brutin D., Starov V., Recent advances in droplet wetting and evaporation, Chem. Soc. Rev., V. 47, 558 – 585 (2018).
2. Kokorin A. V., et al., Experience in registration of evaporation of liquid drops on a substrate by the capacitive method, J. Phys.: Conf. Ser., 012077 (2021).
3. Uc Martín J.A., Diseño y caracterización de sensores capacitivos coplanarios sobre substratos dieléctricos para caracterización de procesos físico – químicos y biológicos, Tesis de Maestría, Tutor: Dr. Asur Guadarrama Santana, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2017.
4. Villatoro J., Monzón-Hernández D., Low-Cost Optical Fiber Refractive-Index Sensor Base on Core Diameter Mismatch, Journal of Lightwave Technology (IEEE), V. 24, 1409 – 1413 (2006)

Depolimerización química de PET de desecho vía glicólisis, para la síntesis de BHET y su posterior esterificación para la obtención de DOTP

López-García, E. J.¹, Rosas-Ramírez, F. de J.¹, Robledo-Pérez, J. M.², Cruz-Gómez M. J.¹

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química ¹,
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria,
04510 Ciudad de México, México.

OMM Chemical Group S. A. de C. V.², Alessandro Volta No.14, Zona Industrial
Cuamatla, Cuautitlán, 54730, Edo. de México, México.

E-mails: elizabeth.logar.iq@gmail.com, iqfer_rosas@hotmail.com,
juanmanuel.robledo@lotufe.com y mjcg@unam.mx

1. Resumen

Este trabajo presenta un estudio experimental para el establecimiento de una metodología a nivel laboratorio del reciclaje químico del poli-(tereftalato de etileno), PET, de desecho mediante glicólisis, cuyo producto intermediario derivado de este proceso, pueda ser empleado como materia prima para la elaboración del plastificante tereftalato de dioctilo, DOTP, de aplicación industrial. También en el presente, se buscó obtener los mejores rendimientos máxicos derivados de la depolimerización a partir de PET de desecho, estudiando experimentalmente con detenimiento la sinergia de las variables más importantes del sistema, como tiempo y temperatura de reacción, relación de reactivos y cantidad de catalizador.

Todo lo anterior, se realizó con la finalidad de darle valor agregado al PET de desecho, para así promover este tipo de reciclaje y que empresas dedicadas al ramo de producción de plastificantes y reciclaje, se vean beneficiados económicamente y se contribuyan a la disminución de la contaminación al medio ambiente.

2. Introducción

El poli-(tereftalato de etileno), PET, es un poliéster termoplástico semicristiano de alta resistencia y transparencia. Este se utiliza ampliamente en la fabricación de fibras de alta resistencia, películas, botellas de bebidas carbonatadas y envases de alimentos. En la actualidad no existe ningún sector que se encuentre exento de su uso ^[1]. El consumo desmesurado de este polímero inició en la década de los 80 's con la intención de sustituir el aluminio y al vidrio, pues sus características, como flexibilidad, ligereza, durabilidad y el bajo costo de producción, hacían del plástico un material predilecto en muchas industrias. México se encuentra entre los países que produce mayor cantidad de PET, debido al alto consumo de refrescos y de agua embotellada. Se estima que al año se producen 200 botellas de PET por cada mexicano. Al año, poco más de ocho millones de toneladas de plásticos van a parar a los océanos y de los millones de toneladas de plástico que se producen, sólo el 14% de envases y embalajes es recogido para ser reciclado en todo el mundo, mientras que el resto termina en el Océano Pacífico, y debido a las corrientes marinas, se ha formado una isla de basura conocida como el “vórtice de plástico” ^[3]. Debido a su gran estabilidad química, este polímero puede permanecer durante cientos de años en el medio ambiente, formando parte de los factores de contaminación más importantes que hoy en día existen y que pone en peligro la salud de los humanos, la de los ecosistemas (incluyendo los acuáticos) y la de especies que los habitan.

Según un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la contaminación por plásticos podría reducirse en un 80% para 2040 si los países y las empresas adoptan cambios significativos en políticas y mercados utilizando tecnologías existentes. El informe *Cerrar el grifo: como el mundo puede poner fin a la contaminación por plásticos y crear una economía circular*, analiza soluciones prácticas, cambios en el mercado y políticas. Propone eliminar plásticos problemáticos e innecesarios, y aboga por reutilizar, reciclar y diversificar productos. También sugiere

eliminar subsidios a combustibles fósiles y mejorar la reciclabilidad para aumentar el reciclaje rentable del 21% al 50%. [5]

El reciclaje de los polímeros al final de su vida útil es deseable por diversas razones, en primer lugar, porque se evita la extracción de materia prima no renovable, se conservan recursos naturales y se elimina cualquier impacto ambiental de la fase de extracción. Además, se evita desechar el material en rellenos municipales cada vez más escasos y costosos. Una alternativa de reciclaje de plásticos es el físico, en el cual el polímero recuperado puede ser reducido de tamaño mecánicamente y nuevamente fundido y moldeado. Otra alternativa al reciclaje físico es el reciclaje químico. Éste consiste en la degradación del polímero a sus unidades monoméricas, que son purificadas y posteriormente utilizadas para obtener el polímero de partida u otros productos intermediarios interesantes con valor agregado. Así el reciclaje químico permite partir de material de menor pureza y obtener productos de calidad similar a los obtenidos de material virgen [2].

Actualmente, la empresa mexicana PetStar tiene la planta de reciclaje de PET más grande del mundo, ubicada en la ciudad de Toluca, Estado de México. Además de acopiar y reciclar botellas de PET post consumo y producir una resina de calidad alimentaria, PetStar provee diversas calidades de PET de desecho, clasificadas según su composición y procesamiento. Algunas de estas calidades de PET son: Primera, Segunda, Verde multi reciclado y Multicolor. Dado que el PET reciclado posee una huella de carbono "cero", existe una gran demanda para fabricar productos que lo contengan. La empresa OMM Chemical Group, S. A. de C. V. ha desarrollado un esquema para la fabricación de DOTP (tereftalato de dioctilo) a partir de PET reciclado. Sin embargo, la fabricación de este plastificante se realiza con materia prima de alta calidad, es decir, PET de primer y segunda calidad, que tienen un relativo alto costo. En cambio, los costos del PET Verde multi reciclado y Multicolor (\$5 MXN y \$8 MXN/Kg respectivamente) son mucho menores en comparación con los costos del PET de Primera y Segunda calidad (este último con valor de \$16 MXN/Kg). El precio de DOTP por kilogramo, es de \$36 MXN. Basado en esto, surge el interés de empresas como OMM Chemical Group en trabajar con materias primas de menor costo, como son los PET verde y multicolor.

Por lo tanto, este proyecto busca, a través del reciclaje químico, obtener productos intermedios y finales de calidad aplicable a usos industriales a partir del PET Verde multi reciclado. También se busca colaborar y trabajar académicamente en conjunto con otros institutos nacionales e internacionales para continuar investigando este tipo de reciclaje y llevarlo a escala industrial. Esto no sólo generará mayores utilidades para la empresa, sino que también promoverá este tipo de reciclaje, permitiendo a otras empresas dedicadas a la producción de resinas o plastificantes, implementar este esquema de producción y contribuir así al cuidado del medio ambiente.

3. Condiciones experimentales

3.1. Síntesis del tereftalato de bis(2-hidroxietilo), BHET.

En un reactor PARR de 2 L de capacidad, se cargan los reactivos: PET, mono etilenglicol, MEG, y el catalizador $[\text{Zn}(\text{O}_2\text{CCH}_3)_2] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, representados en el diagrama propuesto en la figura 3, como las corrientes 1, 2 y 3 respectivamente. Este reactor se programa para alcanzar la temperatura de reacción requerida. Una vez alcanzada dicha temperatura, se inicia el tiempo de reacción a estudiar. Al finalizar la reacción, se enfría el reactor para retirar la mezcla de productos, representada en el diagrama como la corriente 5. La corriente 4 corresponde al MEG que se evapora al abrir el reactor y al que queda adherido a la propela de este.

La corriente 5 se lava inicialmente con 2.5 L de agua corriente sin tratar a 75°C (corriente 6), agitándose para iniciar la purificación del producto de interés, que es el BHET. Después de 5 minutos de agitación en el lavado, esta mezcla (corriente 7) se filtra bajo vacío para separar las corrientes 8 y 9. Posteriormente, la corriente 9 se enfría en un baño de hielo durante 24 horas, utilizando la corriente auxiliar 11, para favorecer la cristalización del BHET, ya que este monómero es insoluble en agua a temperatura ambiente o inferior.

Una vez cristalizados, los cristales de BHET quedan suspendidos en el agua (corriente 10), por lo que se separan nuevamente con vacío, obteniendo las corrientes 12 y 13. En la corriente 13 se obtienen los cristales de BHET, aunque tienen una consistencia ligeramente pastosa debido a la presencia de glicoles, por lo que se someten a un segundo lavado con 500 mL de agua caliente (corriente 14), para favorecer aún más la cristalización. Terminado el segundo lavado, la corriente 15 se enfría en un baño de hielo durante 3 horas con la ayuda de la corriente auxiliar 16.

Finalmente, los cristales de BHET, ahora formados, están suspendidos en el agua (corriente 17), por lo que se separan nuevamente con vacío obteniendo las corrientes 18 y 19. En la corriente 18 se obtienen los cristales de BHET, que se llevan a secar en una estufa a 55°C durante 24 horas. El esquema general de esta depolimerización se muestra en la figura 1.

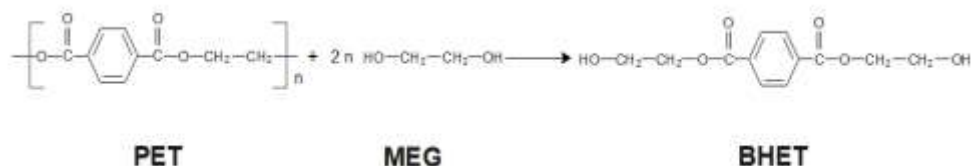


Figura 1. Esquema general de la reacción de depolimerización de PET vía glicólisis.

3.2. Síntesis del tereftalato de dioctilo, DOTP.

En un matraz bola de 100 mL con tres boquillas, se colocan 30 g de BHET, un 10% de exceso en peso de 2-Etil hexanol y un 1% de la masa total de $[\text{C}_8\text{H}_{18}\text{OSn}]$ como catalizador. A continuación, el matraz se coloca en una mantilla de calentamiento y se establecen las conexiones mostradas en la figura 4. En una de las boquillas, se coloca

un termómetro para monitorear la temperatura de la reacción. En otra boquilla, se instala una propela para asegurar una agitación homogénea durante todo el proceso.

En la última boquilla, se monta un sistema de reflujo utilizando una trampa de vidrio y un condensador. Esta trampa ayuda a monitorear el avance de la reacción. En la trampa se colocan 20 g de 2-Etil hexanol y 30 g de agua. Como se observa en la figura 2, un equivalente de BHET reacciona con dos equivalentes de 2-Etil hexanol, produciendo un equivalente de DOTP y dos equivalentes de MEG. Durante la reacción, el reflujo constante del alcohol provoca la evaporación de pequeñas trazas de MEG. Este MEG, debido a la diferencia de densidad y miscibilidad con el alcohol, se disolverá en el agua y será capturado en una probeta, permitiendo su cuantificación por diferencia de peso con el agua.

La temperatura de reacción se mantiene a 180°C, por debajo del punto de ebullición del 2-Etil hexanol (183°C en las condiciones del laboratorio), lo que resulta en un reflujo limitado. Para mantener el reflujo constante, se realizan reposiciones de alcohol a través del sistema de refrigeración, añadiendo 2 g de 2-Etil hexanol a las horas 2, 3, 4, 5 y 6 de la reacción. Esto suma un total de 10 g, representando un 24.4% de exceso adicional de alcohol. Completada la sexta hora de reacción, se inicia la purificación del DOTP producido. La temperatura del sistema se incrementa a 200°C para eliminar todo el exceso de alcohol y el MEG producido. Una vez que se han recolectado los gramos de MEG esperados según la estequiometría, se da por concluida la reacción.

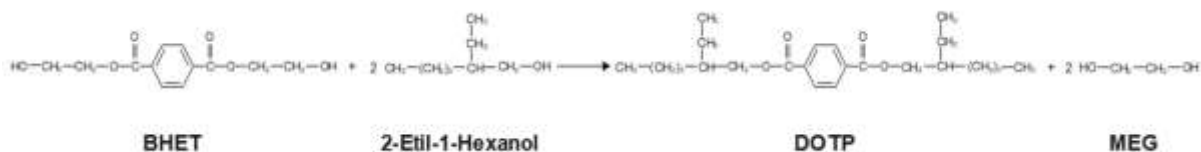


Figura 2. Esquema general de reacción de la transesterificación de BHET para obtener DOTP.

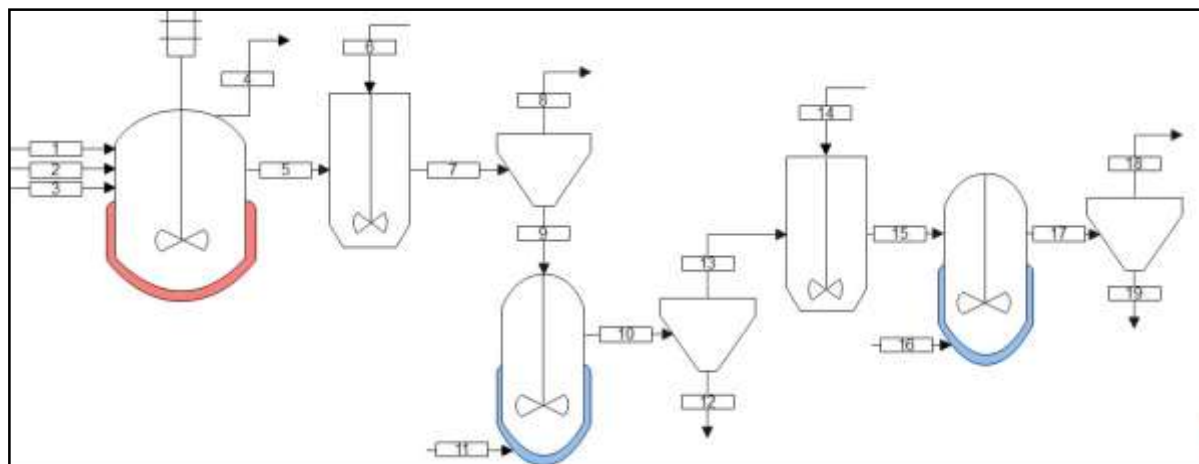


Figura 3. Diagrama propuesto para la producción de BHET.

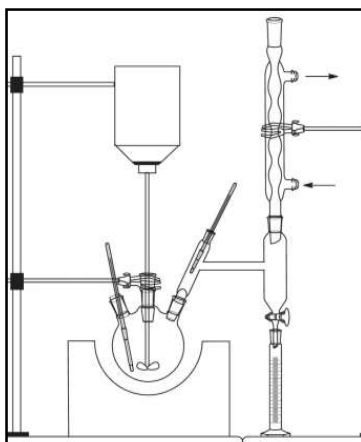


Figura 4. Esquema propuesto para la producción de DOTP.

4. Resultados y discusión

4.1. Modificación de las variables más importantes del sistema para la síntesis del BHET.

Inicialmente, se realizaron diversas pruebas piloto para determinar las variables del sistema más importantes en la obtención de las mejores calidades del producto intermediario, así como los más altos rendimientos.

Primero, se mantuvieron constantes la relación de reactivos, la cantidad de catalizador y la temperatura de reacción, empleando las condiciones reportadas en la referencia [3], y modificando únicamente los tiempos de reacción. Al no observarse un cambio significativo en los rendimientos máxicos ni en la calidad del producto obtenido de la depolimerización del PET de desecho, se optó por modificar las variables que permanecían constantes, partiendo de las condiciones reportadas en el artículo escrito por Yao et al. (2022) [7]. En dicho artículo, se exploraron diversos rangos de variables como la relación MEG/PET, el porcentaje en peso de catalizador, el tiempo y la temperatura de reacción, siendo los valores de 4/1, 5%, 60 minutos y 200°C, respectivamente, las condiciones con las que se obtuvieron los más altos valores de conversión y rendimientos máxicos.

A pesar de que en dicho artículo se trabajó con PET virgen y no reciclado, se decidió extrapolar y estudiar condiciones similares para despolimerizar las dos calidades de PET estudiadas, es decir, el PET de primera calidad y el PET verde multi reciclado. Tras realizar estos estudios, se observó una notable mejoría en cuanto a la calidad y rendimiento de los productos obtenidos. Para hacer concluyentes estos resultados, se estudiaron condiciones inferiores y superiores a las ya establecidas. Derivado de ello, se decidió trabajar con los siguientes valores: para la temperatura, 200°C, 220°C y 240°C; para el tiempo de reacción, 60 minutos, 90 minutos y 120 minutos; para la relación de reactivos, 3/1, 4/1 y 5/1; y para el porcentaje de catalizador, 0.5%, 1% y 5%.

Con los resultados obtenidos, como se observa en la figura 5, los pivotes generados en cada una de las gráficas permiten establecer las condiciones idóneas que garantizan los rendimientos más altos para cada calidad de PET. Estas condiciones, para el caso del PET verde, como se observa en la figura 10, también se correlacionan con la pureza de BHET mediante el punto de fusión obtenido.

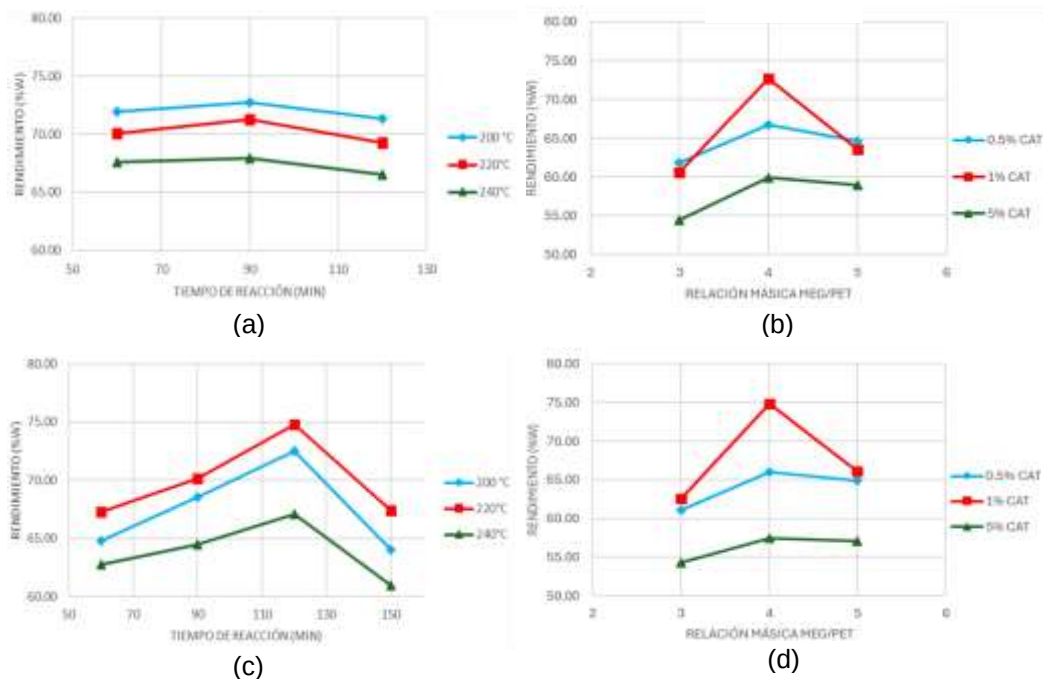


Figura 5. En la gráfica (a) se observa el rendimiento másico a distintos tiempos y temperaturas de reacción, en la (b) el rendimiento másico a distintas relaciones de MEG/PET y % de catalizador (%CAT) respecto a la masa de PET para el PET de primera calidad, la gráfica (c) se observa el rendimiento másico a distintos tiempos y temperaturas de reacción y en la gráfica (d) el rendimiento másico a distintas relaciones de MEG/PET y %CAT respecto a la masa de PET para el PET verde multi reciclado.



Figura 6. BHET sintetizado a partir del PET de desecho de primera calidad.



Figura 7. BHET sintetizado a partir del PET de desecho de primera calidad (izquierda) y verde multi reciclado (derecha).

Los valores obtenidos de rendimientos máxicos son concluyentes en cuanto a temperatura y tiempo de reacción, como se observa en las gráficas 5(a) y 5(b). En la figura 5(a), las condiciones de reacción óptimas para el PET de primera calidad son 200°C y 90 minutos, mientras que en la figura 5(b), para el PET verde multi reciclado, son 220°C y 120 minutos. En cuanto a la relación másica MEG/PET y el porcentaje de catalizador respecto a la masa del PET, las condiciones que proporcionan los rendimientos más altos para ambas calidades de PET estudiadas, figuras 5(c) y 5(d), son 4:1 y 1% de catalizador.

El PET verde multi reciclado requiere mayor temperatura y tiempo de reacción para una adecuada depolimerización en comparación con el PET de primera calidad. Se presume que sucede este efecto debido a la presencia de sustancias contaminantes en el PET verde. El PET de primera calidad, reciclado mecánicamente solo una vez, no tiene color. En contraste, el PET verde, debido al proceso de multi extrusión, se produce una variación en la longitud de las cadenas poliméricas y por tanto, una desnaturalización del material. Es probable que la obtención de BHET a partir de este PET, requiera de mayor energía y tiempo para homogeneizar estas cadenas, además de considerar los efectos de los aditivos que contiene durante los ciclos de fundición repetida.

La figura 6 muestra el BHET sintetizado a partir del PET de primera calidad, mientras que en la figura 7 se presentan los productos derivados de la glicólisis tanto del PET de primera calidad (izquierda) como del PET verde multi reciclado (derecha). En esta última figura, se observa una ligera diferencia en el color de los productos obtenidos.

4.3. Caracterización de los productos obtenidos, BHET y DOTP.

Para la caracterización de ambos productos (intermediario y plastificante), se realizaron análisis de Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC/MS). A continuación, en las figuras 8 y 9, se presentan los cromatogramas derivados de los productos de la depolimerización del PET verde multi reciclado.

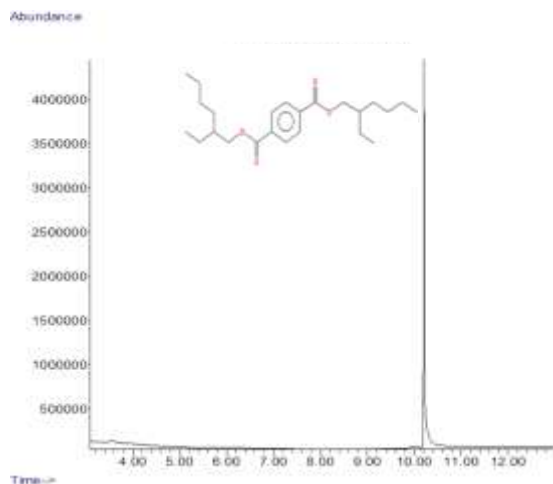


Figura 8. Cromatograma del DOTP sintetizado a partir del BHET obtenido de la depolimerización a 120 minutos del PET verde multi reciclado.

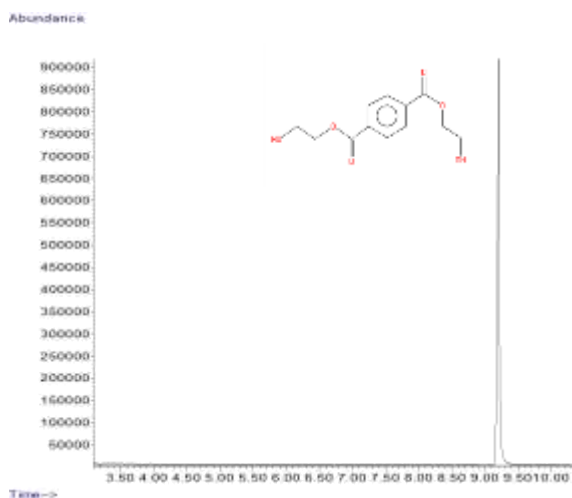


Figura 9. Cromatograma del BHET obtenido de la depolimerización a 120 minutos del PET verde multi reciclado.

Para la caracterización del intermediario BHET, también se realizaron pruebas de punto de fusión, cuyo valor en la literatura se reporta en el intervalo de 106°C a 109°C. Como se observa en la figura 10, el promedio de los puntos de fusión de los intermediarios obtenidos a partir de las depolimerizaciones del PET verde multi reciclado fue muy similar al reportado en la literatura, lo cual indica una buena calidad a pesar de presentar una ligera tonalidad amarilla.

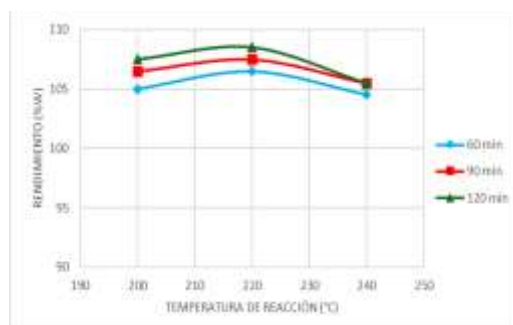


Figura 10. Punto de fusión experimental promedio a distintos tiempos y temperaturas de reacción del BHET obtenido del PET verde.

5. Conclusiones

Con los resultados obtenidos hasta este punto, el objetivo de realizar la reacción de glicólisis a los dos tipos de PET de desecho (de primera calidad y verde multi reciclado), para obtener al producto intermediario BHET y posteriormente realizar a partir de este, la reacción de síntesis de DOTP, así como la caracterización de las muestras obtenidas, se

ha logrado, modificando las variables más importantes en un sistema catalítico para la síntesis del producto intermediario.

Las condiciones experimentales más adecuadas para obtener un buen equilibrio entre mayores rendimientos y una calidad industrialmente aceptable del producto, respecto a temperatura y tiempo de reacción, variaron según la calidad del PET de desecho estudiado. Para el PET de primera calidad, las condiciones óptimas fueron 200°C y 90 minutos. Para el PET verde multi-reciclado, las condiciones fueron 220°C y 120 minutos. En lo que respecta a la relación de reactivos y la cantidad de catalizador, las condiciones fueron las mismas para ambas calidades de PET, con una proporción en peso MEG/PET de 4:1 y un 1% en peso de catalizador.

Además, se ha demostrado que la glicólisis con mono etilenglicol (MEG) es adecuada para el reciclaje químico del PET post consumo, que presenta una naturaleza compleja y diversas características. En comparación con otras vías de despolimerización, como la hidrólisis o la metanólisis, la glicólisis ofrece condiciones de reacción más asequibles y moderadas. Por ejemplo, la presión en el reactor, bajo las condiciones de temperatura estudiadas, es de un máximo de 30 PSI, frente a los 200 o 900 PSI necesarios en la hidrólisis y la metanólisis, respectivamente.

Esta metodología permite obtener buenos rendimientos de DOTP y BHET con alta pureza, como se muestra en las caracterizaciones realizadas a ambos productos. Debido a esto, la empresa OMM Chemical Group, ha mostrado interés en estos desarrollos y nuevas aplicaciones.

La purificación del producto intermediario BHET, derivado del PET verde multi reciclado mediante el uso de carbón activado, ha demostrado ser efectiva. A través de la experimentación con diferentes tiempos de remoción y cantidades variables de carbón activado, se observó una clara relación entre el tiempo de contacto y la eficiencia de la remoción del color amarillo. Este proceso ha resultado prometedor para la eliminación eficaz de impurezas cromáticas, destacando la importancia de mejorar las condiciones operativas para maximizar la pureza del producto final. Sin embargo, esta última parte experimental, aún se encuentra en proceso de estudio y desarrollo.

Finalmente, también se pretende estudiar el sistema directo, es decir, la reacción del PET, MEG y 2-Etil hexanol para la producción directa de DOTP. Esta nueva alternativa será implementada para su comparación con el método actual. Se espera del mismo modo, que esta aplicación genere interés tanto en la industria, incluyendo a empresas como OMM Chemical Group, así como en colaboraciones académicas con instituciones como la Technische Universität Braunschweig (TUBS). (9).

6. Bibliografía

1. Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eissa, A. M. F., Moustafa, M. E., Eshaq, G., Rabie, A. M., & El Metwally, A. E. (2014). Ionic liquids as Efficient Catalysts for the Glycolysis of Polyethylene Terephthalate. *Egyptian Journal of Chemistry*, 57(4). <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2014.1045>

2. Chiao, Y. W., Liao, W., Krisbiantoro, P. A., Yu, B. Y., & Wu, K. C. W. (2023). Waste-battery-derived multifunctional zinc catalysts for glycolysis and decolorization of polyethylene terephthalate. *Applied*
3. Castillo, N. (1995). *Reciclaje terciario de poli-(tereftalato de etileno)*. Técnicas químicas de depolimerización. Tesis de Maestría. México. D.F.
4. Chen, J., et al. (2014). *Alcoholólisis de PET para producir tereftalato de dioctilo mediante alcohol iso-octílico con líquido iónico como cosolvente*. Degradación y estabilidad de polímeros. 178-179.
5. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2023). *Cerrar el grifo: cómo el mundo puede poner fin a la contaminación por plásticos y crear una economía circular*.
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/42277/Plastic_pollution.pdf?sequence=3
6. Xin, J., Zhang, Q., Huang, J., Huang, R., Jaffery, Q. Z., Yan, D., Zhou, Q., Xu, J., & Lu, X. (2021). Progress in the catalytic glycolysis of polyethylene terephthalate. *Journal of Environmental Management*, 296, 113267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113267>
7. Yao, H., Liu, L., Yan, D., Zhou, Q., Xin, J., Lu, X., & Zhang, S. (2022). Colorless BHET obtained from PET by modified mesoporous catalyst ZnO/SBA-15. *Chemical Engineering Science*, 248, 117109. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117109>
8. Zhu, M., Li, S., Li, Z., Lu, X., & Zhang, S. (2012). Investigation of solid catalysts for glycolysis of polyethylene terephthalate. *Chemical Engineering Journal*, 185–186. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.068>
9. Characterization, scaling and assessment of PET recycling technologies tailored for the Mexican market. Proyecto propuesto por la UNAM, Facultad de Química y la Technische Universität Braunschweig, TUBS, Institute for Chemical and Thermal Process Engineering, Braunschweig/Germany. Actualmente en revisión para su autorización, por parte del ICAT de la UNAM.

Producción de tereftalato de dioctilo a partir de tereftalato de dimetilo obtenido mediante el reciclaje químico de poli-(tereftalato de etileno) de desecho vía metanólisis

García-Morales, C.J., Rosas-Ramírez, F. de J.¹, Robledo-Pérez, J. M.², Cruz-Gómez M. J. ¹

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química ¹,

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria,

04510 Ciudad de México, México.

OMM Chemical Group S. A. de C. V.², Alessandro Volta No.14, Zona Industrial Cuamatla, Cuautitlán, 54730, Edo. de México, México.

E-mails: 314073134@quimica.una.mx, iqfer_rosas@hotmail.com, juanmanuel.robledo@lotufe.com y mjcgc@unam.mx

1. Resumen

La contaminación por plásticos es un problema que afecta a todos los seres humanos alrededor del mundo por lo que en el presente trabajo se busca llevar a cabo la depolimerización de poli-(tereftalato de etileno) (PET, por sus siglas en inglés) de desecho vía metanólisis a nivel laboratorio en un reactor PARR evaluando diferentes condiciones de temperatura (170-240 °C) y tiempo de reacción (20-90 minutos), utilizando acetato de Zinc como catalizador para obtener tereftalato de dimetilo (DMT). El DMT obtenido fue caracterizado mediante cromatografía de gases, punto de fusión e infrarrojo; y posteriormente se hizo reaccionar con 2-etilhexanol para obtener tereftalato de dioctilo (DOTP).

2. Introducción

En estudios recientes se calcula que sólo el plástico representa el 3.4% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, esto debido a que la mayor parte de los residuos producidos de este material se destinan a los rellenos sanitarios, se incineran o se filtran en el medio ambiente, y, a nivel mundial, apenas el 9% se recicla con éxito. En la actualidad, en México se producen 300 millones de toneladas de plásticos al año, de las cuales se calcula que únicamente se recicla el 3%.^[1]

La mayoría del plástico que se utiliza hoy en día es de origen primario, y aunque la producción mundial de plástico a partir de plástico reciclado se ha cuadruplicado (pasando de 6.8 millones de toneladas en 2000 a 29.1 Mt en 2019) esto representa únicamente el 6% del volumen de la producción total de plástico; considerando que alrededor del 50% de los plásticos producidos actualmente se desechan después de un solo uso, es necesario emprender más medidas para crear un mercado funcional para el plástico reciclado.^[2]

A lo largo de los años se han desarrollado diversos métodos y tecnologías para reciclar plásticos, entre estos métodos se encuentra el reciclaje químico que consiste en la ruptura de la estructura química de un polímero a partir de reacciones químicas, Las reacciones más comunes son la hidrólisis

(que produce ácido tereftálico), glicólisis (para producir bis(2-hidroxietil)tereftalato, BHET), metanólisis (que genera DMT) y la aminólisis.^[3] En el presente proyecto se pretende llevar a cabo la reacción de metanólisis como ruta para depolimerizar poli-(tereftalato de etileno) de desecho de distintas calidades, encontrando las condiciones de reacción más adecuadas que permitan la obtención de tereftalato de dimetilo.

Una vez producido, el DMT puede ser utilizado como materia prima para obtener diversos productos de interés comercial, uno de ellos es el tereftalato de dioctilo (DOTP), comúnmente utilizado como plastificante en la industria del policloruro de vinilo (PVC).^[4]

3. Condiciones experimentales

3.1 Sistema reactivo

La reacción de principal depolimerización de poli-(tereftalato de etileno) mediante metanólisis sigue el siguiente esquema:

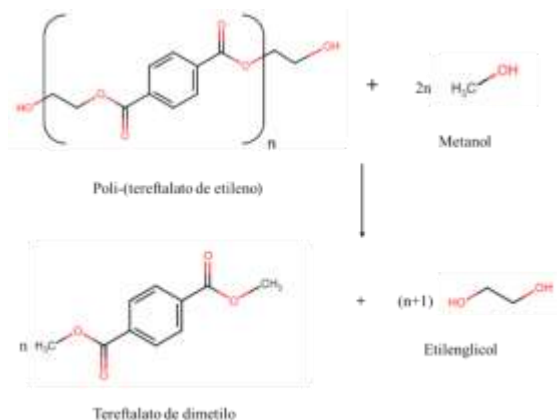


FIGURA 6. REACCIÓN GENERAL PARA LA SÍNTESIS DE DMT.

El tereftalato de dioctilo se produce de acuerdo con la siguiente reacción:

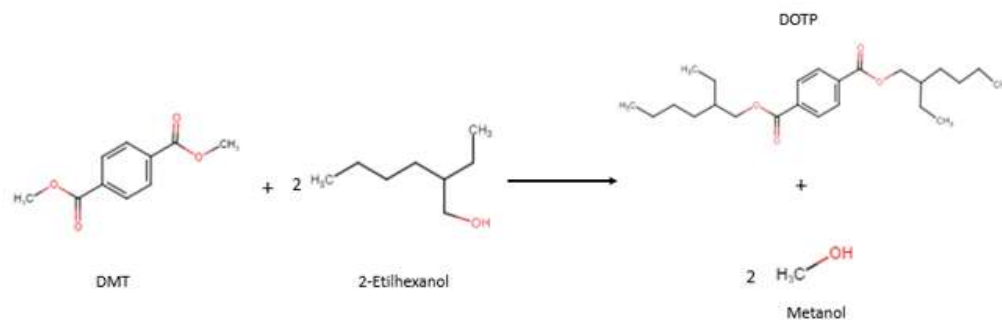


FIGURA 7. REACCIÓN PARA LA SÍNTESIS DE DOTP.

3.2 Materiales

Para la depolimerización se utilizaron 3 tipos distintos de PET denominados “primera calidad”, “verde multireciclado” y “exótico multicolor o confeti”; metanol y acetato de zinc como catalizador. La reacción se realizó en un reactor PARR de 2 L de acero inoxidable anexo a un controlador PARR 4848.

Para la síntesis de DOTP se requirió el uso de 2-etil-1-hexanol y el catalizador óxido de dibutilestaño.

Todos los reactivos utilizados fueron proporcionados por la empresa *OMM Chemical Group*, a excepción del acetato de zinc que fue adquirido de Reactivos Meyer.

TABLA 8. TIPOS DE PET UTILIZADOS.

Nombre	Apariencia	Figura
PET de primera		<i>Figura 3</i>
PET verde		<i>Figura 4</i>
PET exótico		<i>Figura 5</i>

3.2 Metodología

Todas las reacciones de depolimerización se realizaron en un reactor PARR manteniendo constante la cantidad de catalizador (1% respecto al peso del PET) y la relación de reactivos (70/30 peso metanol/PET), y se modificaron dos variables:

- Tiempo de reacción
- Temperatura de reacción

Para llevar a cabo la depolimerización, se colocaron en el reactor PARR, PET, metanol y acetato de zinc, se cerró el equipo y se inició el calentamiento; una vez se cumplieron el tiempo y temperatura deseados se enfrió el reactor y una vez que alcanzó una temperatura inferior a 35 °C se desmontó el sistema. Los tiempos analizados variaron entre 20 y 90 minutos mientras que las temperaturas de 170 hasta 240 °C. El producto obtenido de cada reacción fue filtrado para separar los sólidos del metanol que no reaccionó, posteriormente se le realizaron lavados con agua caliente y se dejó secar. Al

producto seco se pasó por una rejilla para eliminar cualquier sólido que pudiera seguir presente y obtener así un DMT libre de glicoles y otros contaminantes.

La producción del plastificante DOTP fue llevada a cabo a partir del DMT previamente obtenido, mezclándolo con 2-etilhexanol y catalizador (óxido de dibutilestaño), la reacción mantuvo un tiempo de 4 horas en un reactor de vidrio acoplado a una trampa (*figura 7*), en la cual se colocó agua y 2-etilhexano con el objetivo de captar el metanol que se produjera en la reacción y tener una recirculación constante del reactivo en exceso (2EH).

TABLA 9. EQUIPOS UTILIZADOS



Figura 6. Reactor PARR



Figura 7. Sistema de reacción para sintetizar DOTP

4. Resultados y discusión

4.1 Metanólisis

Una vez realizadas las reacciones correspondientes, los productos obtenidos fueron caracterizados con la ayuda de un cromatógrafo de gases con una columna de 30 metros, flujo de 1 mL/min, presión de 8.26 lb y temperatura de inyección de 300 °C. Mediante del cromatograma obtenido fue posible comprobar que el compuesto se trataba de DMT. La figura 8 mostrada a continuación es un ejemplo de uno de los cromatogramas obtenidos:

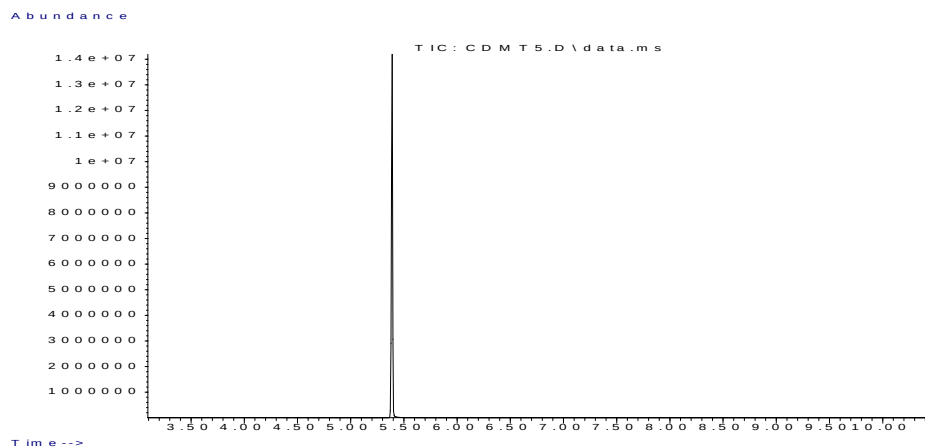


Figura 8. Cromatograma correspondiente al DMT obtenido a partir de PET verde a 220°C y 30 minutos de reacción.

El DMT obtenido resultó ser un polvo fino cuya coloración varia dependiendo del PET con el que fue producido. El DMT proveniente de PET de primera calidad tuvo color blanco, el DMT exótico adquirió una coloración grisácea, mientras que el verde presentó el color que le dio su nombre.

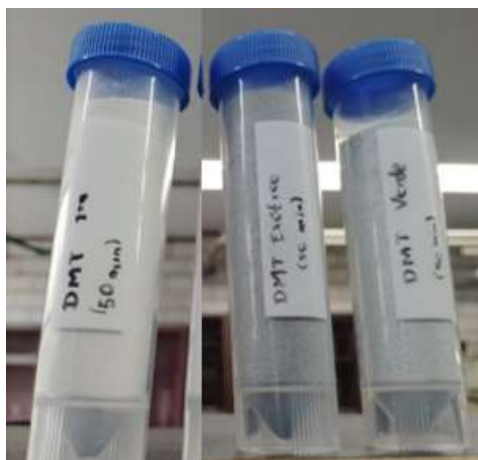


FIGURA 9. TEREFALATO DE DIMETILO OBTENIDO A PARTIR DE LA DEPOLIMERIZACIÓN DE PET DE PRIMERA CALIDAD (IZQUIERDA), EXÓTICO (CENTRO) Y VERDE (DERECHA).

Los gráficos a continuación (figuras 10 y 11) corresponden a los rendimientos obtenidos para el DMT proveniente del PET verde y en estos es posible observar que los mejores rendimientos se obtienen a los 190 °C y con tiempos de reacción de 30 minutos. A menor tiempo de reacción disminuyen los rendimientos además en los productos se observa mayor presencia de sólidos y una coloración más intensa.

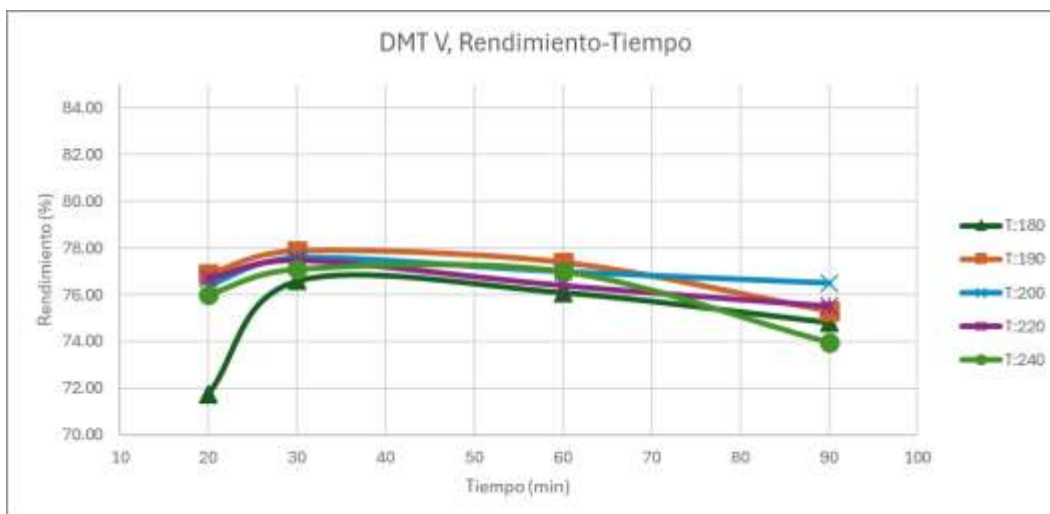


Figura 10. Gráfico de rendimiento vs tiempo a las diferentes temperaturas de reacciones para el DMT obtenido a partir de PET verde.

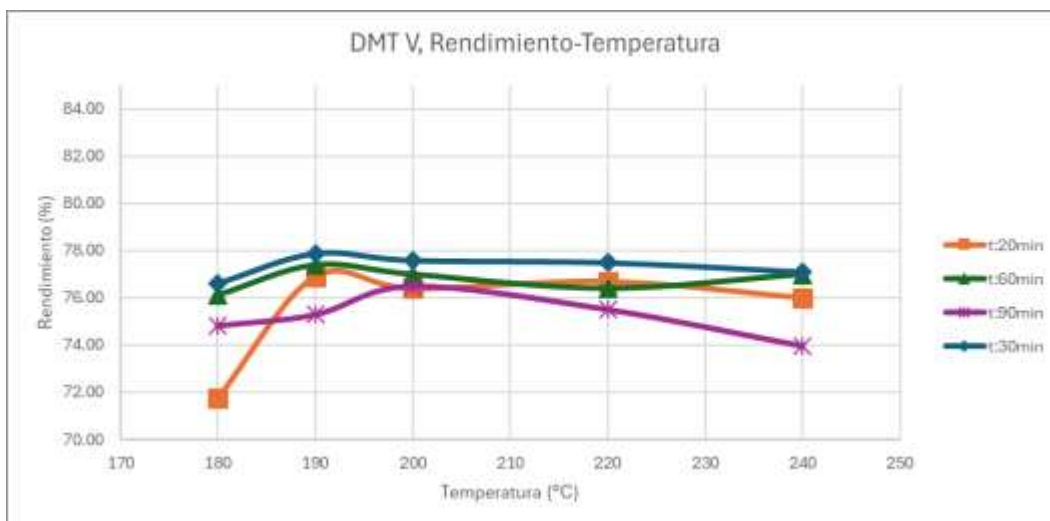


Figura 11. Gráfico de rendimiento vs temperatura a los diferentes tiempos de reacción para el DMT obtenido a partir de PET verde.

En el caso de las figuras 12 y 13 corresponden a los rendimientos del DMT proveniente de PET exótico, los rendimientos a tiempos de reacción de 30 y 60 minutos fueron muy similares, al igual que los rendimientos a 180 y 190 °C. A tiempos de reacción mayores a 60 minutos comenzaron a

disminuir los rendimientos. La coloración se mantuvo constante sin importar las variaciones en tiempo ni en temperatura.

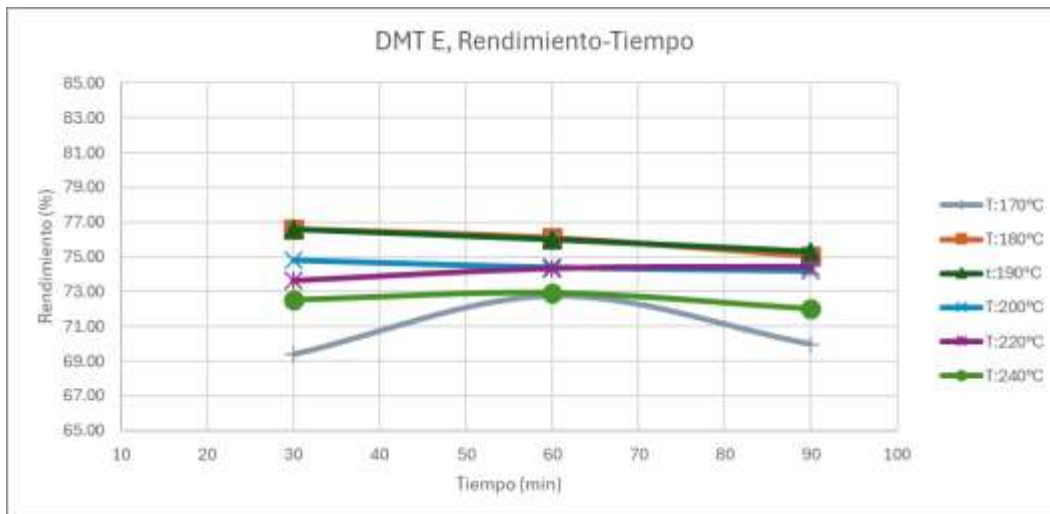


Figura 12. Gráfico de rendimiento vs tiempo a las diferentes temperaturas de reacciones para el DMT obtenido a partir de PET exótico.

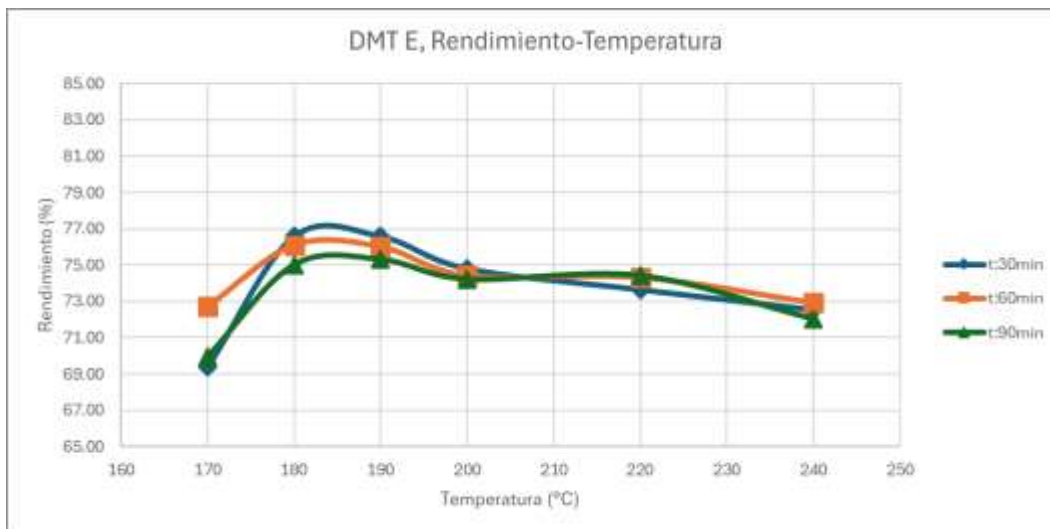


Figura 13. Gráfico de rendimiento vs temperatura a los diferentes tiempos de reacción para el DMT obtenido a partir de PET exótico.

4.2 Producción de DOTP

Esta parte del proyecto se encuentra aún en desarrollo, para las reacciones realizadas a la fecha de elaboración del presente trabajo se utilizaron algunos de los productos obtenidos en la metanólisis.

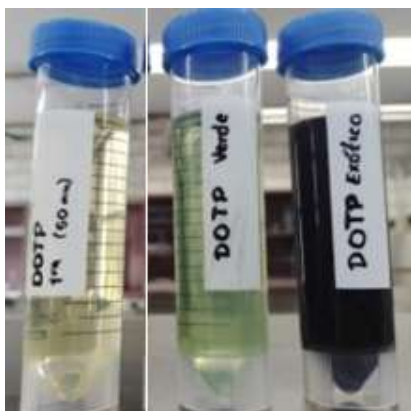


Figura 15. Tereftalato de dioctilo obtenido de primera calidad (izquierda), verde (centro) y exótico (derecha).

Tabla 3. Rendimiento del DOTP.

Calidad de PET	Tiempo Rx DMT (min)	Rendimiento MeOH (%)
1ra	60	61.21
verde		81.82
exótico		33.33
1ra	90	46.06
verde		50.31
exótico		55.36

Tabla 4. Abundancia de presencia de DOTP en cromatogramas

Calidad/Tiempo	60 min	90 min
1ra	8.00E+06	2.40E+06
Verde	6.00E+06	2.60E+06
Exótico	3.20E+07	NA

Los rendimientos de la reacción se calcularon a partir del metanol recolectado en la trampa de vidrio. Para este proceso también se realizaron los cromatogramas de los productos obtenidos, al analizarlos es posible ver que tanto la abundancia como el rendimiento disminuyen para las reacciones en las que se utilizó el DMT obtenido en las reacciones más largas (90 minutos en comparación con las de 60 minutos).

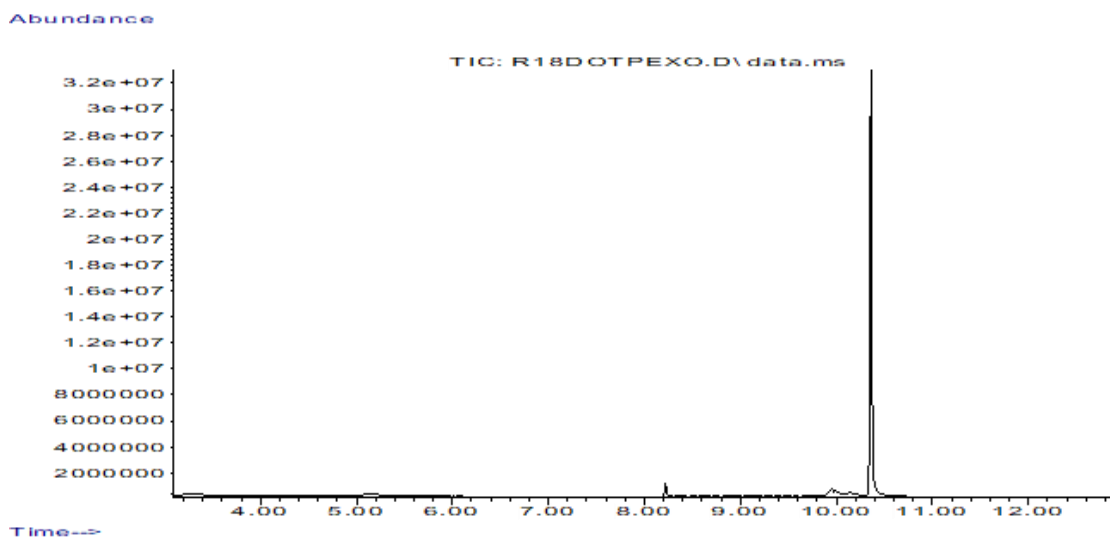


Figura 15. Cromatograma correspondiente al DOTP obtenido a partir del DMT exótico

5. Conclusiones

Al realizar la metanólisis del PET de desecho es posible obtener DMT, el cual sirve a su vez como materia prima para producir el plastificante DOTP. Los productos obtenidos presentan variaciones dependiendo de la calidad de PET con la que se trabaje, todos los cambios en el desarrollo experimental repercuten también en los productos obtenidos. Para la obtención de DMT verde las mejores condiciones fueron 190 °C y 30 minutos de reacción, mientras que para el DMT exótico las más favorables fueron de 180 °C y 30 minutos.

La parte experimental para la producción de DOTP aún se encuentra en proceso, pero con los experimentos e investigación realizados hasta el momento es posible afirmar que se está avanzando por un buen camino para la obtención de DOTP con aplicabilidad industrial a partir de PET de desecho.

6. Bibliografía

1. Santillán, M. L. (2018). Una vida de plástico. Ciencia UNAM. Obtenido de: <https://ciencia.unam.mx/leer/766/una-vida-de-plastico#:~:text=Cabe%20destacar%20que%20M%C3%A9xico%20se,de%20PET%20por%20cada%20mexicano>
2. RETEMA, revista Técnica de Medio Ambiente (2024). *Solo el 9% de los residuos plásticos generados en el mundo se recicla, según la OCDE.*
3. Castillo, N. N. (1995). Reciclaje terciario de poli-(tereftalato de etileno). Técnicas químicas de depolimerización. México. D.F.
4. Dupont, LA, Gupta, VP. (1993) Degradative transesterification of terephthalate polyesters to obtain DOTP plasticizer for flexible PVC. J Vinyl Technol.

Metodología química automatizada para análisis de plomo en agua

Rodríguez-Maese, R1; Rodríguez-Saldaña, V1; Leal-Quezada L. O.1

1Departamento de Medio Ambiente y Energía, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV). Av. Miguel de Cervantes No. 120, Chihuahua, Chih. C.P. 31136, México

rogelio.rodriguez@cimav.edu.mx

veronica.rodriguez@cimav.edu.mx

luz.leal@cimav.edu.mx

1. Resumen

Este estudio se enfoca en el desarrollo de una metodología analítica completamente automática, para determinar Pb (II) mediante la técnica de análisis en flujo Multisyringe flow injection analysis - Lab on valve (MSFIA-LOV), con agitación automática y detección espectrofotométrica a 520 nm. El Pb se extrae en línea en una microcolumna con resina selectiva (resina-PB) y se forma el complejo Pb-PAR usando 4-(2-piridilazo) resorcinol como reactivo cromogénico. La agitación automática aumenta la señal analítica a través de un motor giratorio y una varilla de acero inoxidable que forma un dispositivo agitador sumergible. El límite de detección es de $0.79 \mu\text{g L}^{-1}$, permitiendo análisis precisos por debajo de los niveles de referencia establecidos para el Pb en agua potable por los organismos internacionales. El método presenta buena precisión (RSD 4.2%), alta frecuencia de análisis y automatización completa, lo que lo convierte en una herramienta portátil y de bajo costo. Validado con material de referencia certificado (agua subterránea, BCR®-610), el método mostró recuperaciones de alrededor del 100% en diversas matrices de agua.

Palabras clave: Plomo, Automatización, Extracción en fase sólida, Técnicas en flujo, Reacción colorimétrica

2. Introducción

El plomo es un elemento químico que, incluso a bajas concentraciones, puede ser tóxico y causar serios problemas de salud, como anemia, trastornos neurológicos, estrés oxidativo e hiperactividad. Por lo tanto, su control y monitoreo en muestras de agua ambiental es de suma importancia []. En este sentido, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un valor de referencia para el Pb en agua potable de $10 \mu\text{g L}^{-1}$, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) indica que para valores superiores a $15 \mu\text{g L}^{-1}$ se deben tomar acciones preventivas, y la normativa mexicana establece un valor de $25 \mu\text{g L}^{-1}$ para el agua potable (2,4).

Entre las técnicas para la detección de Pb (II) en soluciones acuosas, la detección espectrofotométrica presenta un bajo costo de operación y mantenimiento, y junto con un adecuado pretratamiento de la muestra, garantiza determinaciones rápidas y precisas del

analito. Dependiendo del tamaño de la trayectoria óptica del detector, esta técnica puede ser una herramienta útil y portátil en estudios de campo(5,6)..

La detección espectrofotométrica requiere una derivatización colorimétrica previa, para lo cual el agente cromogénico 4-(2-piridilazo)-resorcinol (PAR) es una excelente opción en análisis rutinarios (7,8). Sin embargo, su sensibilidad para reaccionar con otros cationes, obliga a un pretratamiento de la muestra para la extracción selectiva del plomo, especialmente en muestras ambientales. Para tal efecto, se han utilizado diferentes métodos químicos, como la extracción con solventes [], la coprecipitación [], la extracción en el punto de nube (9), la microextracción y la extracción en fase sólida (SPE) (12, 13).

La SPE ofrece ventajas atractivas, como la reutilización de la fase sólida, alta frecuencia de análisis, baja generación de residuos, elevado factor de preconcentración y el mínimo uso de solventes tóxicos. En el presente trabajo, se utilizó resina-PB como material de extracción, debido a que su estructura de éter corona tiene una alta afinidad por el plomo, incluyendo una elevada estabilidad para un gran volumen de muestra. Además, en el mismo paso, se puede realizar la extracción y la preconcentración, lo cual es relevante en el análisis traza de muestras ambientales, usualmente a concentraciones que están en el orden de $\mu\text{g L}^{-1}$ [13,14].

La celda capilar de largo paso óptico (LWCC) es un dispositivo donde la solución coloreada se refleja dentro de un tubo capilar. Las paredes internas del tubo tienen un índice de refracción menor que el núcleo líquido contenido en él, por lo que la luz que pasa a través de él se refleja totalmente hacia el detector, minimizando el ruido de fondo. Su larga trayectoria óptica, mejora la sensibilidad y los límites de detección de los métodos espectrofotométricos comunes, atributo fundamental en determinaciones a niveles traza [15]. En el presente trabajo, se utilizó una LWCC de 100 cm de longitud [16,17].

Las metodologías de análisis en flujo, como el análisis por inyección en flujo multijeringa (MSFIA) y el laboratorio en válvula (LOV), permiten el desarrollo de sistemas completamente automáticos, logrando la reducción drástica de reactivos y del manejo de muestras, así como la mejora en el rendimiento, reproducibilidad y tiempo por análisis [18].

El propósito del presente trabajo fue desarrollar un sistema completamente automatizado y portátil MSFIA-LOV, con agitación automática asistida, para monitorear los niveles de plomo en el agua.

3. Condiciones experimentales

3.1 Reactivos y disoluciones

Las especificaciones generales de los reactivos y materiales utilizados fueron los siguientes: ácido nítrico (HNO_3) 69.5%, J.T. Baker, Avantor Performance Materials S.A. de C.V., México; 4-(2Pyridilazo) resorcinol (PAR) 96%, Sigma-Aldrich, EE.UU; NH_4OH 29%, J.T. Baker, Avantor Performance Materials S.A. de C.V., México; resina-PB, 50–100 μm , Eichrom Industries- Lisle, EE.UU; estándar de plomo de $1000 \pm 2.5 \text{ mg L}^{-1}$, Centro Nacional de Metrología, México - CENAM.

3.2 Preparación de muestras

Diferentes muestras de agua (subterránea, de grifo y embotellada) fueron analizadas utilizando el sistema automático propuesto. Estas muestras se recolectaron en la ciudad de Chihuahua, en el norte de México, donde el monitoreo del plomo disuelto es muy importante debido a las actividades mineras y la presencia de una antigua planta fundidora abandonada. Las muestras se acidificaron a 1 mol L^{-1} de HNO_3 y se analizaron directamente. Después, se fortificaron con una concentración conocida de plomo y se analizaron nuevamente. También se utilizó un material de referencia certificado de agua subterránea (BCR®-610), elaborado por el Community Bureau of Reference de la Comisión Europea (Bruselas, Bélgica), para verificar la precisión del método.

3.3 Características de la columna para SPE

La PB-resin es un material cromatográfico de extracción, compuesto por un éter corona (4, 4' (5')-di-t-butilciclohexano-18-crown-6) diluido en isodecanol y recubierto en un soporte inerte. Según el fabricante, esta resina permite la extracción selectiva de plomo, debido a los complejos de nitrato formados en soluciones de HNO_3 . Antes de la extracción de plomo, la resina necesita ser acondicionada con HNO_3 a la misma concentración que el medio de la muestra. Según estudios previos y siguiendo las especificaciones del fabricante, el acondicionamiento se realizó con una solución de HNO_3 1 mol L^{-1} [14].

3.4 Montaje de la metodología analítica automatizada

El sistema (Figura 1) está compuesto por un módulo MSFIA, un dispositivo LOV de 10 posiciones y dos válvulas, una de selección de 8 posiciones y una solenoide externa. El módulo MSFIA está compuesto por un motor de movimiento vertical de 5000 pasos (BU4S; Crison Instruments, Barcelona, España) y está equipado con cuatro jeringas de vidrio (Hamilton, Suiza): tres de 10 mL (S1, S2 y S4) y una de 5 mL (S3). A la salida del flujo de cada jeringa, una válvula solenoide de tres vías (N-Research, Caldwell, NJ, EE.UU.) facilita la aplicación de esquemas de multiconmutación (on; off), direccionando los reactivos y la muestra.

El microconductor LOV (Sciware Systems, Bunyola, España) de 10 posiciones (Crison Instruments), está fabricado de metacrilato e integrado por nueve microcanales (1.5 mm i.d./16.0 mm longitud) y una microcolumna (3.2 mm i.d./16.0 mm longitud) rellenable con 0.4 g de resina-PB, cuya salida es obstruida con lana de fibra de vidrio comprimida, lo que retiene el material sólido extractante mientras los líquidos fluyen libremente. El conducto central (CC) del LOV se conecta a S1 mediante un bucle de tubería para retención de 15 mL (HC1) y cada posición queda definida de la siguiente manera: P1: muestra en una solución final de 1 mol L⁻¹ de HNO₃. P2: eluyente (HNO₃, 0.005 mol L⁻¹). P4: reservorio resina-PB (5 mL) con resina suspendida en HNO₃, 1 mol L⁻¹. P5: HNO₃, 1 mol L⁻¹, acondicionador. P8: dirige líquidos al tanque de mezcla (MxT). P9: microcolumna SPE. P10: desecho (contenedor de residuos). Las posiciones P3, P6 y P7 quedan disponibles para estándares de calibración.

En la salida de la posición 9, una válvula solenoide adicional (V1, MTV-3-N 1/4 UKG; Takasago, Japón) dirige los líquidos a la posición deseada (off: desecho; on: tanque de mezcla). El MxT es un tambor de jeringa de cristal Hamilton, cuya salida está montada sobre una válvula de selección rotativa de ocho puertos (Crison). En la parte superior del MxT, se ha colocado una tapa donde se encuentra el motor de giro del sistema de agitación automática de 12 V (M). La red de flujo está construida con tubos de PTFE de 0.8 mm de diámetro interno. Todas las conexiones y accesorios de jeringa se realizan mediante conectores de fluoruro de polivinilideno (PVDF), excepto las uniones cruzadas, que están hechas de metacrilato.

El sistema de detección está compuesto por una fuente de luz casera con un LED verde de alta intensidad y dos fibras ópticas de 400 y 600 µm de diámetro interno (Ocean Optics, EE.UU.). Se acopló la celda LWCC tipo II, hecha de Teflon AF 2400 (World Precision Instruments, FL, EE.UU.), con una longitud efectiva de trayectoria de 100.0 ± 0.5 cm, un diámetro interno de 550 µm y un volumen interno de 240 µL, a un espectrofotómetro CCD miniaturizado USB 2000 (Ocean Optics, EE.UU., 520 nm.) conectado a una computadora

mediante una interfaz USB. Se empleó el software AutoAnalysis 5.0 (Sciware Systems, Bunyola, España) para el control del instrumento, adquisición y procesamiento de datos.

El movimiento giratorio del sistema de agitación se transmitió a una varilla de acero inoxidable diseñada como un agitador sumergible. Se introdujo en el MxT y se ajustó adecuadamente la velocidad de rotación.

El método fue optimizado mediante un diseño de experimentos multivariante, empleando el software estadístico Minitab® 17.1.0 y STATISTICA 13.5.0., utilizando como detector un Espectroscopio de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) (Thermo Scientific, ICAP 6500), equipado con un nebulizador neumático concéntrico (Meinhard, EE.UU.) para realizar los análisis. Todas las mediciones se hicieron por triplicado.

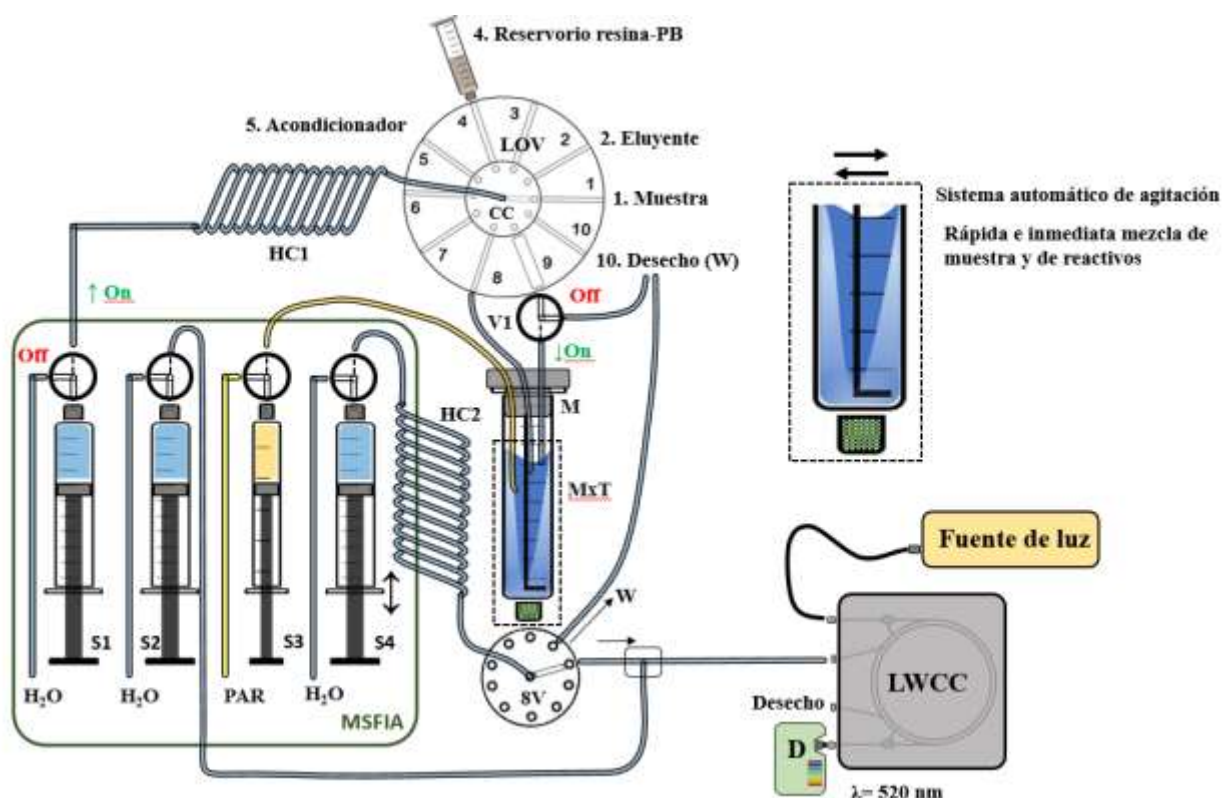


Figura 1. Metodología MSFIA-LOV con sistema automático de agitación. Celda capilar de largo paso óptico (LWCC), Jeringas (S1-4), válvula solenoide externa (V1), bucle de tubería (HC1-2), motor giratorio (M), válvula de selección de 8 puertos (8V) y detector (D).

3.5 Procedimiento automático para el análisis de plomo

El procedimiento de la determinación analítica de Pb mediante el método automático propuesto se describe de la siguiente manera:

1. Carga automática de la resina: La microcolumna se llena automáticamente con resina-PB. Primero, la resina se carga en HC1 desde su depósito (P4) y luego se dispensa a P9 (V1, off: desecho) para llenar la columna.
2. Acondicionamiento de la microcolumna: Se dispensan 3 mL (P5) a través de la microcolumna (P9, V1: off, desecho).
3. Carga de la muestra: El volumen de interés de estándar o muestra (P1) se dispensa a través de la microcolumna (P9) (V1: off, desecho).
4. Elución de Pb: Se dispensan 3 mL de solución (P2) a través de la microcolumna (P9). El eluyente con plomo se recibe en el tanque de mezcla (V1: on, MxT).
5. Reacción colorimétrica PAR-Pb: Se dispensan 0.3 mL de solución de PAR (S3) en MxT. El PAR se prepara en solución de NH_4OH ($\text{pH} = 11$). Se aplica agitación por 5 s y se hace una pausa de 10 s, para obtener la formación del complejo PAR-Pb.
6. Detección espectrofotométrica a 520 nm: La solución de PAR-Pb de MxT se carga en un segundo bucle de tubería (HC2). La válvula de selección rotatoria de ocho puertos (8V) se coloca en el puerto del detector, y luego se dispensan 0.7 mL de solución de PAR-Pb (S2) y 1.5 mL de agua desionizada a través del LWCC; se activa la detección espectrofotométrica, permitiendo 3 picos de absorbancia para cada muestra analizada.
7. Limpieza del MxT y del sistema: Antes de analizar la siguiente muestra, se realiza una rutina de limpieza. Usando P8 de LOV, se dispensan 8 mL de agua desionizada en MxT. Con S2, se dispensan simultáneamente los mismos volúmenes a través del LWCC. Para una limpieza eficiente de MxT, se activa el mecanismo de agitación, luego se carga todo el volumen líquido de MxT en HC2 y se dispensa al puerto de desecho correspondiente en 8V. Finalmente, usando S1, se dispensan 5 mL de agua desionizada a través del LWCC.

4. Resultados y discusión

4.1 Condiciones óptimas del trabajo analítico

Siguiendo las indicaciones del fabricante y de acuerdo con la literatura, las condiciones óptimas de elución de la resina-PB (volumen y concentración de HNO_3) fueron estudiadas utilizando un ICP-OES como detector. Para ello, el rango de concentración y el volumen bajo estudio fueron (0.005 - 0.015) mol L^{-1} y (1 – 4) mL, respectivamente. Se realizaron once experimentos derivados de un diseño de superficie de respuesta, incluyendo tres puntos centrales para la evaluación de la curvatura y la falta de ajuste. Cada uno de estos experimentos se llevó a cabo por triplicado. El análisis de varianza (ANOVA) de los resultados mostró que el modelo matemático sugerido se ajustó en un 98% a todas las respuestas ($R^2\text{-adj}$) y que todos los residuos están distribuidos normalmente. Por lo tanto, con el modelo matemático y la herramienta de optimización, el software Minitab® 17 arrojó como resultados el usar 3 mL de HNO_3 a una concentración de 0.005 mol L^{-1} como condiciones óptimas de elución.

Bajo estas condiciones de elución, se analizó la formación del complejo Pb-PAR. Para ello, se prepararon dos soluciones de 3 mL de HNO_3 0.005 mol L^{-1} , donde una de ellas se enriqueció con 6 mg L^{-1} usando una solución estándar de plomo. Se añadió un volumen de 0.4 mL de solución PAR al 0.01% preparada en NH_4OH (pH = 10) a cada una de las soluciones de HNO_3 . La absorbancia de ambas soluciones se analizó mediante un espectrofotómetro UV-VIS Perkin Elmer Lambda 10. Los valores obtenidos fueron similares a los reportados en la literatura [], con una absorbancia máxima de 520 nm para el complejo Pb-PAR. Con base en esta información, se llevó a cabo la optimización de la reacción colorimétrica automatizada.

La metodología de optimización comenzó con un cribado estadístico para estudiar las variables independientes y sus posibles interacciones mediante un diseño factorial completo 2^3 . Se evaluaron tres factores en dos niveles, lo que resultó en 8 experimentos, a los que se añadieron tres puntos centrales para identificar cualquier curvatura y estimar el error. Las variables estudiadas fueron: concentración de PAR (0.0001–0.001) %, pH (9–12) y volumen de solución PAR (0.1–0.5) mL. Se realizaron once corridas experimentales por triplicado. Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente (tabla ANOVA, gráfico de Pareto, gráfico de distribución de probabilidad, etc.), mostrando que todos los factores tienen una influencia significativa en la señal analítica de Pb dentro del dominio experimental. Por lo tanto, se realizó un diseño de superficie de respuesta con las mismas variables. El ANOVA mostró que el modelo matemático sugerido se ajusta en un 99% a todas las respuestas ($R^2\text{-adj}$) y que todos los residuos están distribuidos normalmente. Las condiciones óptimas para el complejo PAR-Pb para la detección espectrofotométrica en el presente trabajo fueron: concentración de PAR 0.0005%, pH 11 y un volumen de PAR de 0.3 mL.

4.2 Parámetros analíticos característicos de la metodología

Una vez optimizada la metodología propuesta, se obtuvo una curva de calibración (absorción neta versus $\mu\text{g L}^{-1}$ de Pb (II)) con un ajuste estadísticamente satisfactorio ($y = 0.002677 \pm 0.000002 x + 0.441215 \pm 0.000022$, $R^2 = 0.9967$, $n = 10$), guardando una linealidad en el rango de concentración de 2.6 a $240 \mu\text{g L}^{-1}$ de plomo.

Los límites de detección (LOD) y de cuantificación (LOQ) calculados fueron de 0.79 y de $2.6 \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente, y se evaluaron de acuerdo con lo establecido por la IUPAC [,]. Por lo tanto, la metodología propuesta es capaz de analizar los valores de referencia establecidos para el agua potable por las agencias de regulación nacional e internacional.

El sistema automático propuesto permite la extracción de plomo en un volumen final de solución de 3.3 mL. Para volúmenes de muestra mayores a 3.3 mL, se realiza una preconcentración, mientras que para volúmenes menores se lleva a cabo una dilución del analito, lo cual es útil para muestras más concentradas.

La vida útil funcional de la resina se ve afectada según el volumen de muestra analizada. En este trabajo, se probaron volúmenes de 1 a 25 mL ($30 \mu\text{g L}^{-1}$ de Pb). Con 1 mL de muestra, una carga única de resina en la microcolumna mantuvo una eficiencia de extracción buena (por encima del 90%) en 95 análisis consecutivos (desviación estándar relativa, RSD= 3.8%). Para volúmenes de muestra de 25 mL (muestras de agua ambientales con concentraciones muy bajas de plomo), la resina mantuvo una buena eficiencia, también por encima del 90%, hasta 10 análisis (RSD = 4.3%).

La precisión interdía del método fue del 4.2%, determinada a partir de resultados obtenidos en diferentes días de trabajo ($n=5$), cambiando la resina de extracción y utilizando una solución de $10 \mu\text{g L}^{-1}$ de Pb. La precisión intradía del método fue del 3.3% ($n=10$), determinada a partir de resultados obtenidos en un solo día de trabajo, sin cambiar la resina y utilizando una solución de $10 \mu\text{g L}^{-1}$ de Pb.

La frecuencia de análisis del sistema propuesto depende del volumen de la muestra. Para 1 mL de muestra, el sistema es capaz de realizar 4 análisis por hora, mientras que, para una muestra de 25 mL, el análisis está listo en 1 hora y 35 minutos. Es importante mencionar que el sistema es capaz de sustituir de forma automática la resina empleada.

4.3 Validación y aplicación a muestras ambientales

Se utilizó el material certificado de agua subterránea BCR®610 para validar el sistema propuesto. Además, el método se aplicó para analizar diferentes muestras de agua (una de agua embotellada comercial, dos de agua de grifo y once de agua de pozo), realizando cada análisis por triplicado (n=3). Para la muestra BCR-610, la prueba estadística t para la comparación de medias no mostró diferencias significativas entre el valor certificado ($7.78 \pm 0.13 \mu\text{g L}^{-1}$) y el valor encontrado ($7.78 \pm 0.13 \mu\text{g L}^{-1}$), con un nivel de confianza del 95%. Es importante destacar que el BCR®610 también contiene cationes como Al ($159 \pm 4 \mu\text{g L}^{-1}$), As ($10.8 \pm 0.4 \mu\text{g L}^{-1}$), Cd ($2.94 \pm 0.08 \mu\text{g L}^{-1}$) y Cu ($45.7 \pm 1.5 \mu\text{g L}^{-1}$), los cuales no afectaron la determinación de plomo en la muestra. Las muestras de agua fueron enriquecidas con una concentración conocida de plomo.

Los resultados mostraron recuperaciones satisfactorias, entre el 90 y el 105%. La muestra de agua del grifo (T2) se recogió de una casa antigua, donde las tuberías tienen segmentos con soldadura a base de plomo. Se debe mencionar que las muestras de agua de pozo, donde se encontraron trazas de este metal, fueron tomadas de depósitos al aire libre cerca de una antigua empresa de fundición de este metal; cada uno de los valores descritos se muestran a detalle en la Tabla 1.

Tabla 1: Estudio y validación de la metodología propuesta con su aplicación a diferentes muestras de agua.

Muestra certificada BCR®610	Valor certificado	Valor encontrado
Agua subterránea	$7.78 \pm 0.13 \mu\text{g L}^{-1}$	$7.78 \pm 0.13 \mu\text{g L}^{-1}$

Muestra*	Añadido ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Encontrado ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Recuperación (%)
Botella de agua comercial	0	< LOQ	
	5	5.2	104.0
Agua de grifo	0	< LOQ	

	5	4.9	98.0
	0	3.4	
	5	8.6	102.4
Agua de pozo	0	< LOQ	
	5	4.91	98.2
	0	<LOQ	
	5	4.91	98.2
	0	2.88	
	5	7.52	95.4
	0	<LOQ	
	5	4.94	98.8
	0	3.56	
	5	8.28	96.7
	0	<LOQ	
	5	4.52	90.4
	0	<LOQ	
	5	4.53	90.6
	0	<LOQ	
	5	5.1	102
	0	<LOQ	
	5	5.23	104.6
	0	12.23	
	5	15.5	90.0

0	7.3	
5	11.8	95.9

5. Conclusiones

Se presentó el desarrollo de una metodología totalmente automática en un sistema compacto y portátil, que permite obtener resultados inmediatos, precisos y confiables para la determinación de plomo en matrices ambientales de agua, demostrando ser una herramienta robusta, rápida y útil para el monitoreo continuo y/o rutinario. Esta metodología, en términos de automatización, se beneficia de las ventajas analíticas que ofrecen las técnicas de análisis en flujo, las cuales, junto con un sistema de agitación automático, aprovechan el potencial de la extracción en fase sólida (SPE) y su determinación espectrofotométrica que, con la implementación de una celda capilar de largo paso óptico (LWCC), permite alcanzar los valores de referencia de Pb establecidos para agua potable por varias agencias reguladoras. Por lo tanto, el sistema desarrollado ofrece varias ventajas, como simplicidad, selectividad, sensibilidad, bajos costos operativos e instrumentales, que además de ser portátil para trabajos de campo cerca del área de interés, el método actual reduce significativamente el uso de muestras y reactivos, contribuyendo a los principios de la química verde.

5.1. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV) a través del proyecto interno PI-2024-01.

6. Bibliografía

1. Sharma, P., Chambial, S. & Shukla, K.K. Lead and Neurotoxicity. *Ind J Clin Biochem* **30**, 1–2 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12291-015-0480-6>
2. WHO Guidelines for Drinking-water Quality, World Health Organization 3rd. Edition. WHO, Geneva, 004.

3. EPA Contaminantes en agua potable, Environmental protection agency, office of water (4100T), 1200 Pennsylvania avenue, N.W. Washington, D.C., 20460, 2009. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=60001N8P.txt> (Last acces february 2019).
4. NOM-127-SSA1-1994, Mexicana, N. O., Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, México, 1994.
5. S.G. Silva, J.A. Nóbrega, F.R. Rocha, Exploiting Mn, (III)/EDTA complex in a flow system with solenoid micro-pumps coupled to long pathlength spectrophotometry for fast manganese determination, *Microchem. J.* 98 (1) (2011) 109–114, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2010.12.004>.
6. W. Khaodee, W. Aeungmaitrepirom, T. Tuntulani, Effectively simultaneous nakedeye detection of Cu (ii), Pb (ii), Al (iii) and Fe (III) using cyanidin extracted from red cabbage as chelating agent, *Spectrochim. Acta A: Mol. Biomol. Spectrosc.* 126 (2014) 98–104, <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.01.125>.
7. I.M. Rahman, Y. Furusho, Z.A. Begum, R. Sato, H. Okumura, H. Honda, H. Hasegawa, Determination of lead in solution by solid phase extraction, elution, and spectrophotometric detection using 4-(2-pyridylazo)-resorcinol, *Centr. Eur. J. Chem* 11 (5) (2013) 672–678, <https://doi.org/10.2478/s11532-013-0203-x>.
8. R.M. Dagnall, T.S. West, P. Young, Determination of lead with 4-(2-pyridylazo)resorcinol—1: spectrophotometry and solvent extraction, *Talanta* 12 (1965) 583–588, [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(65\)80071-6](https://doi.org/10.1016/0039-9140(65)80071-6).
9. J.H. Jung, I. Yoon, K.J. Park, S.S. Lee, K.S. Choi, S.B. Park, Solvent extraction of silver (I) over lead (II) by oxygen–sulfur mixed donor podands, *Microchem. J.* 63 (1) (1999) 100–108, <https://doi.org/10.1006/mchj.1999.1771>.
10. D.S.K. Peker, O. Turkoglu, M. Soylak, Dysprosium (III) hydroxide coprecipitation system for the separation and preconcentration of heavy metal contents of table salts and natural waters, *J. Hazard. Mater.* 143 (1–2) (2007) 555–560, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.075>.
11. X. Wen, Q. Deng, S. Ji, S. Yang, L. Peng, Design of rapidly synergistic cloud point extraction of ultra-trace lead combined with flame atomic absorption spectrometry determination, *Microchem. J.* 100 (2012) 31–35, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.08.005>.
12. F. Shah, T.G. Kazi, H.I. Afridi, M. Soylak, Temperature controlled ionic liquid-dispersive liquid phase microextraction for determination of trace lead level in blood samples prior to analysis by flame atomic absorption spectrometry with multivariate optimization, *Microchem. J.* 101 (2012) 5–10, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.09.009>.
13. M.C. Barciela-Alonso, V. Plata-García, A. Rouco-López, A. Moreda-Piñeiro, P. Bermejo-Barrera, Ionic imprinted polymer based solid phase extraction for cadmium and lead pre-concentration/determination in seafood, *Microchem. J.* 114 (2014) 106–110, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.12.008>.
14. Eichrom Technologies, LLC, USA, 2019<https://www.eichrom.com/eichrom/products/pb-resin/>.
15. L.A. Zimmer, G.A. Cutter, High resolution determination of nanomolar R. Rodríguez-Maese, et al. concentrations of dissolved reactive phosphate in ocean surface waters using long path liquid waveguide capillary cells (LWCC) and spectrometric detection, *Limnol. Oceanogr. Methods* 10 (8) (2012) 568–580, <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.568>.

16. E. Gomez, J.M. Estela, V. Cerdà, M. Blanco, Simultaneous spectrophotometric determination of metal ions with 4-(pyridyl-2-azo) resorcinol (PAR), Fresen. J. Anal. Chem. 342 (4–5) (1992) 318–321, <https://doi.org/10.1007/BF00322177>.
17. A.P. Argekar, A.K. Shetty, Extraction of lead (II) with cyanex 302 and its spectrophotometric determination with par, Talanta 45 (5) (1998) 909–915, [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(97\)00192-6](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(97)00192-6).
18. V. Cerdà, L. Ferrer, J. Avivar, A. Cerdà, Flow Analysis: A Practical Guide. Newnes, eBook ISBN, 2014 9780444626066.
19. R.M. Dagnall, T.S. West, P. Young, Determination of lead with 4-(2-pyridylazo)resorcinol—1: spectrophotometry and solvent extraction, Talanta 12 (1965) 583–588, [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(65\)80071-6](https://doi.org/10.1016/0039-9140(65)80071-6).
20. G.L. Long, J.D. Winefordner, Limit of detection. a closer look at the IUPAC definition, Anal. Chem. 55 (7) (1983) 712A–724A, <https://doi.org/10.1021/ac00258a001>.
21. J. Miller, J.C. Miller, Statistics and Chemometrics For Analytical Chemistry, Pearson Education, 2018.

Síntesis y estudio de un material cerámico de níquel, zinc y hierro

Chávez M. M.¹, Salcedo, L. M. C.², Hernández, M. L.¹,

Soto, T. M. L.¹, Goñi, C. H. B.¹

¹Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, CBI, Área de Química, CDMX, México

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, USAII, DRX, C. U., CDMX, México
 cmm@azc.uam.mx, cecy1269@yahoo.com.mx, hml@azc.uam.mx
 mlst@azc.uam.mx, gch@azc.uam.mx

1. Resumen

Se sintetizó un material cerámico $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ por coprecipitación. Su estructura resultó tipo Espinela cúbica $\text{A}^{2+}\text{B}^{3+}\text{O}_4$. La celda unitaria contiene 8 unidades AB_2O_4 con un total de 64 átomos. La caracterización estructural de esta ferrita se realizó por Difracción de Rayos – X de polvos. El refinamiento estructural se realizó por el método de Rietveld y el programa Fullprof. Los valores cristalográficos determinados de la estructura son $a = 8.382 \text{ \AA}$; ángulos: $\alpha, \beta, \gamma = 90^\circ$; $M = 237.73 \text{ g/mol}$; $V = 589.05 \text{ cm}^3$; $D_x = 5.361 \text{ g/cm}^3$. S. G. = $\text{Fd}3\text{m}$ (227). El tamaño promedio del cristal = $290 \text{ \AA}$. La microdeformación = 9.54 %. Color de la ferrita fue naranja rojizo. Para la determinación de la temperatura de Curie (T_c), se realizaron estudios de Análisis Térmico Gravimétrico (TGA), Análisis Térmico Diferencial (DTA), Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). La Temperatura de Curie, (T_c) de la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ fue de 480 K.

2. Introducción

El magnetismo es un fenómeno físico que presentan algunos materiales o sustancias capaces de atraer o repeler a otros, como en el caso del hierro, cobalto, níquel, gadolinio y disprosio. Este tipo de fenómenos han sido una clave importante para comprender la estructura atómica de los materiales. Por ejemplo, las propiedades magnéticas se originan por acoplamientos cuánticos a nivel atómico, es decir por acoplamiento entre el espín del electrón y el momento angular del electrón, es lo que se conoce como acoplamiento L-S: Level-Spin.^[1]

Por otra parte, las energías de interacción en los materiales tienen que ver con el volumen, bulto o cantidad. Estas energías, son generadas principalmente por el momento magnético orbital del electrón, el momento de spin del electrón y el momento del espín del núcleo. Esto se puede medir, lo que hace posible estudiar las interacciones mediante medidas de magnetización en función del campo magnético y magnetización en función de la temperatura, mediante Espectroscopía Mössbauer y Resonancia Magnética.^[2]

Uno de estos fenómenos magnéticos es el ferromagnetismo, en el que los momentos magnéticos están separados en varios dominios, los cuales generan en conjunto una magnetización espontánea, debido al efecto de reducir la energía magnética total del cristal. Los diferentes dominios tienen direcciones diferentes y están separados por las paredes del dominio. Ahora bien, la capacidad de desplazamiento de las paredes de dominio tiene un efecto predominante en las propiedades magnéticas de materiales que son ferromagnéticos.^[3]

El interés del estudio de los materiales magnéticos, es por sus importantes aplicaciones en el campo de la electrónica. Algunos ejemplos son: los registros magnéticos, imanes permanentes, pigmentos coloreados, catalizadores cerámicos, aplicaciones en dispositivos de microondas, protectores de corrosión o recubrimientos antioxidantes y ferrofluidos entre otros. En particular si son materiales ferro o ferrimagnéticos, estos son aptos para cintas de audio y video, así como en instrumentación y aplicaciones digitales.

En el presente trabajo se sintetizó una ferrita de Níquel y Zinc, con estequiometría $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ por el método de coprecipitación.^[4,5] Esta ferrita es del tipo espinela cúbica $\text{A}^{2+}\text{B}^{3+}_2\text{O}_4$ y su relación atómica puede ser $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$. La celda unitaria contiene 8 unidades AB_2O_4 con un total de 64 átomos. Para la caracterización estructural de la ferrita sintetizada se realizaron estudios por Difracción de Rayos – X de polvos.

Una vez que se comprobó la fase de la ferrita tipo espinela, se hizo un refinamiento por el método de Rietveld para determinar con mayor precisión los parámetros estructurales a partir de un modelo teórico de MgAl_2O_4 que se ajusta al patrón de difracción experimental.

Con el refinamiento de la estructura fue posible determinar los datos cristalográficos de la ferrita obtenida. El parámetro $a = 8.382 \text{ \AA}$; los ángulos: $\alpha, \beta, \gamma = 90^\circ$; $M = 237.73 \text{ g/mol}$; $V = 589.05 \text{ cm}^3$ y la densidad $= 5.361 \text{ g/cm}^3$. Grupo espacial = $\text{Fd}3\text{m} (227)$. Tamaño promedio del cristal $= 290 \text{ \AA}$ y la microdeformación $= 9.54 \%$. El color de la ferrita fue naranja rojizo.

Para la determinación de la temperatura de Curie (T_c), se realizaron estudios de Análisis Térmico Gravimétrico (TGA), Análisis Térmico Diferencial (DTA), Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), y Espectroscopía Mössbauer. La Temperatura de Curie, T_c de la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ fue 480 K.

3. Condiciones experimentales

El procedimiento de síntesis por coprecipitación^[6], consiste en preparar una disolución, generalmente acuosa, que contenga las especies químicas, a la cual se añade un agente precipitante. En este caso se prepararon 50 mL de una disolución 0.78 M de Na_2CO_3 en un vaso de precipitados de 250 mL. Esta disolución se mantuvo en agitación lenta en una parrilla de calentamiento con agitación, marca THERMO SCIENTIFIC modelo SP-131325 de temperatura de 5 a 540°C, y velocidad de agitación de 50 a 1200 rpm; a una temperatura de 60 a 80 °C. El pH de la disolución se mantuvo de 9 a 10, con la adición necesaria de una disolución de NaOH 0.1 M.

Por otra parte, se prepararon disoluciones de 50 mL de cloruros de los iones Fe^{3+} 0.34 M, Ni^{2+} 0.084 M y Zn^{2+} 0.084 M. Los reactivos utilizados fueron marca Aldrich con 99.99 % de pureza. Las cantidades calculadas para cada concentración fueron pesadas en una balanza analítica OERTLING modelo NA 114 con 0.0001 g de precisión y capacidad máxima de 200 g.

Estas disoluciones se adicionaron a la solución de carbonato con ayuda de una bureta de 50 mL a una velocidad de 5mL/ min aproximadamente. El precipitado se dejó reposando dos horas a una temperatura de 60 a 80 °C con agitación constante.

Posteriormente el precipitado se dejó que se asentara durante una noche y después se separó, utilizando una centrifuga BECKMAN modelo Optima™ de 150 000 rpm. El precipitado obtenido se lavó 5 veces hasta que la prueba de cloruros dio negativa. Después, el producto así obtenido se colocó dentro de un crisol de porcelana marca COORS de 30 mL de capacidad y se introdujo en un horno marca FELISA de 250°C de temperatura máxima, a 40°C durante 12 horas. El producto seco, se molió en un mortero de ágata marca SPI SUPPLIES de 10 mm de diámetro; hasta obtener un polvo muy fino. Nuevamente se colocó en el crisol de porcelana, el cual fue llevado dentro de una mufla marca THERMOLYNE de temperatura máxima de 1 200°C; desde temperatura ambiente hasta 600°C. Una vez obtenida esta temperatura se dejó así por 2 horas. Luego se dejó enfriar a temperatura ambiente.

Al material así obtenido se le acercó un imán para detectar la atracción entre el imán y la ferrita obtenida. Una vez comprobado el magnetismo, se fabricó una pastilla con un pastilladora manual marca PARR INSTRUMENT. El producto se analizó por Difracción de Rayos – X de Polvos, (DR-X Polvos) para su caracterización. Se utilizó un Difractómetro marca BRUKER modelo D8 Advance con diseño DaVinci con tubo de cobre configurado para polvos, con detector Lynx Eye de alta velocidad. La radiación empleada fue $\text{CuK}\alpha_1$ con $\lambda = 1.542 \text{ \AA}$.

Así mismo, a este material se le determinó la Temperatura de Curie (T_c). Se colocaron 2 imanes en el soporte, el material obtenido de ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ se calentó por encima de la temperatura de Curie, cuando se enfrió por debajo de esa temperatura

fue atraído por el imán. A los 24 segundos después del enfriamiento ocurrió la atracción del material.

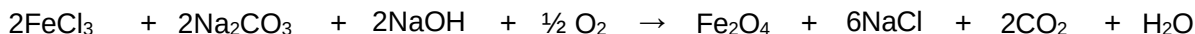
Para las mediciones de la T_c se utilizaron las técnicas de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y Análisis Térmico Gravimétrico (TGA).^[7] Los equipos utilizados fueron TA Instruments Q2000 y Q500 respectivamente, ambos con dos termopares para el control de calentamiento simultáneo y medición de la temperatura de la muestra. En el caso del TGA, la muestra se colocó cerca de un imán para obtener dos resultados: la del peso y la fuerza de atracción magnética. En contraste se midió el calor específico del mismo material de ferrita obtenido $Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ en el DSC en donde se obtuvo la T_c bajo el criterio de máxima variación de calor específico.^[8,9] Con estos datos se logró determinar la contribución magnética.

El estudio realizado por Resonancia Paramagnética Electrónica (RPE) fue con un Espectrómetro marca BRUKER modelo EMX. Tiene control de temperatura, control del puente de microondas, un magnetómetro, un amplificador de modulación y un controlador de campo magnético aplicado. Éste último tiene la función de regular la fuente de poder ER-085 CS, la cual alimenta las bobinas de un electroimán V3800 VARIAN de 12", responsables de la generación del campo magnético aplicado a la cavidad de resonancia. En esta cavidad se colocó la muestra la cual fue irradiada con microondas de frecuencia $\nu = 9.5$ GHz; proveniente del puente de microondas ER-041 XG. El puente de microondas cumple con dos funciones, una es producir la microonda que irradia la muestra y la otra detecta la señal RPE. El puente de microondas se conecta con el módulo controlador, el cual está acoplado con una computadora, la cual controla todo el equipo y a su vez registra la señal RPE.

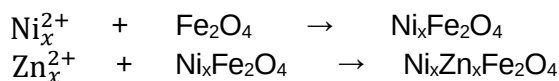
4. Resultados y discusión

4.1 Síntesis

La secuencia de reacciones químicas llevadas a cabo describe los resultados de obtención de la ferrita $Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$. Primero se obtuvo la magnetita Fe_2O_4 , que puede llamarse óxido ferroso-férrico, o propiamente peróxido de hierro.

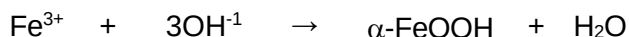


La incorporación de iones metálicos de Ni^{2+} y Zn^{2+} a la estructura cristalina tipo espinela formada, puede representarse:



Los iones Fe^{2+} posiblemente se desplazaron a la estructura en formación, pero simultáneamente estos iones sufren oxidación por la presencia de OH^{-1} , formándose así iones Fe^{3+} . Todo esto ocasiona mayor formación de magnetita y por lo tanto se verán aumentadas las propiedades magnéticas de este material.

Debido a los tratamientos térmicos y por la presencia de iones OH^{-1} es posible que ocurran otras reacciones, tales como la formación de goethita.



Las composiciones propuestas para níquel y zinc fueron $x = 0.6$ y $x = 0.4$ respectivamente, para la obtención de la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$. Es por eso que la concentración de las disoluciones preparadas tuvo que ser calculada con valores diferentes. El cálculo fue para obtener 5 g de ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

4.2 Difracción de Rayos – X de polvos

En la figura 1 se muestra el patrón de difracción de la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$, cuyos valores de 2θ obtenidos de la muestra: 35.573, 2.9639 y 1.4830 corresponden a las señales de mayor intensidad cuando los rayos –X se difractan en la muestra. Estos valores fueron cotejados con los de la base de datos del International Centre for Diffraction Data (ICDD), utilizando el Powder Diffraction File (PDF).^[10] Los valores obtenidos para la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ se identificaron con la tarjeta 00-52-1278. La grafica de la figura 1 muestra el refinamiento de la estructura $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$, por el método de Rietveld. El análisis de DRX determinó que las muestras son monofásicas hasta una concentración de Zn = 0.5.

Así mismo el tamaño de celda disminuyó a medida que la concentración de Zinc aumentó. A concentraciones mayores se comprobó que pierde la simetría cubica. La masa molecular es de 237.73 g/mol; el volumen es 589.05 cm^3 y la densidad es 5.361 g/cm^3 . El color de la muestra es naranja café rojizo, pero que al ser comparado con el sistema de colores CPK, convención química de colores corresponde al naranja de hierro. El sistema de colores fue desarrollado por Robert Corey, Linus Pauling y Walter Koltun.^[11,12] El grupo espacial es el de una celda cubica $\text{Fd}3\text{m}$ (227). Los parámetros de la celda: $a = 8.382 \text{ Å}$, presentando una estructura tipo espinela normal $\text{A}^{2+}\text{B}^{3+}_2\text{O}_4$. El tamaño promedio del cristal es de 290 Å y la microdeformación es 9.54 %.

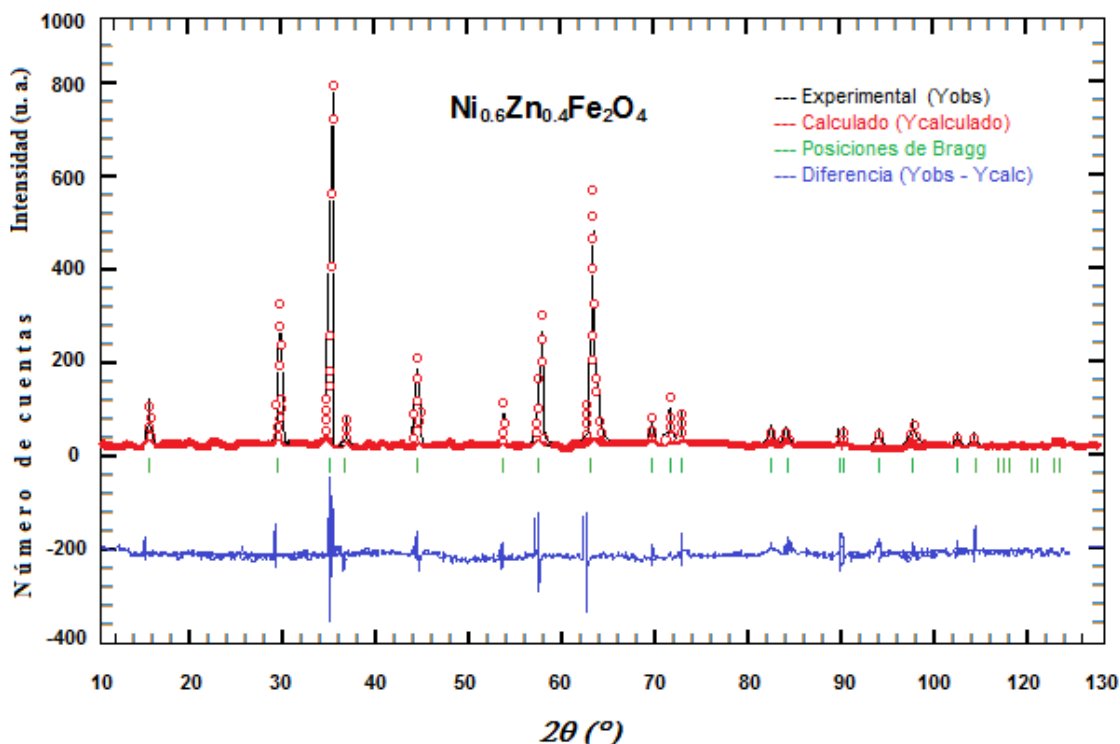


Figura 1. Patrón de difracción de Rayos – X con refinamiento por Rietveld de la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

En la tabla 1 se presentan las señales de difracción, con los valores del ángulo 2θ , las distancias interplanares (d), la intensidad (I) y los hkl obtenidos para la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$. En la tabla 2 se exhiben las coordenadas atómicas y las posiciones de Wyckoff, así como la simetría correspondiente.

Tabla 1. Valores de 2θ , (d), (I) y hkl para la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

Señal de difracción	Ángulo 2θ	$d_{\text{calculada}}$	$I_{\text{calculada}}$	hkl
1	18.256	4.8600	17	111
2	30.155	2.9639	38	022
3	35.573	2.5240	100	133
4	37.172	2.3719	10	222
5	43.361	2.0899	26	004
6	53.465	1.7139	15	224
7	57.070	1.6139	33	333
8	62.650	1.4830	41	044

Tabla 2. Coordenadas atómicas, posiciones de Wyckoff y simetría para la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

Átomo	Num	Wyckoff	Simetría	x	y
Fe	1	8a	43m	0.0	0.0
Ni/Zn	2	16d	3m	0.625	0.625
Ni/Zn	3	8a	43m	0.0	0.0
Fe	4	16d	3m	0.625	0.625
O	5	32e	3m	0.387	0.387

Átomo	Num	z	SOF	AET
Fe	1	0.0	0.17	4-a
Ni/Zn	2	0.625	0.085	6-a
Ni/Zn	3	0.0	0.83	4-a
Fe	4	0.625	0.915	6-a
O	5	0.387	1.0	4-a

4.3 Análisis Térmico Gravimétrico

La figura 2 muestra la gráfica de calibración de la temperatura con la determinación de la temperatura de Curie para el Níquel.

La cantidad de muestra de ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ utilizada para el análisis fue de 40 mg. Las medidas se realizaron mediante un software Advantage Thermal Analysis. La calibración de temperatura del equipo TGA, se realizó con un estándar de Níquel, cuya temperatura de fusión es de 1455°C y con propiedades magnéticas por debajo de los 350°C . Para la determinación experimental de la temperatura de Curie se utilizó un estándar del Níquel, el cual se colocó dentro de un recipiente a peso constante y cerca del imán. Se calentó y se observó que la temperatura experimental de Curie ocurrió a 358.15°C , es decir, a esta temperatura el Níquel perdió sus propiedades magnéticas.

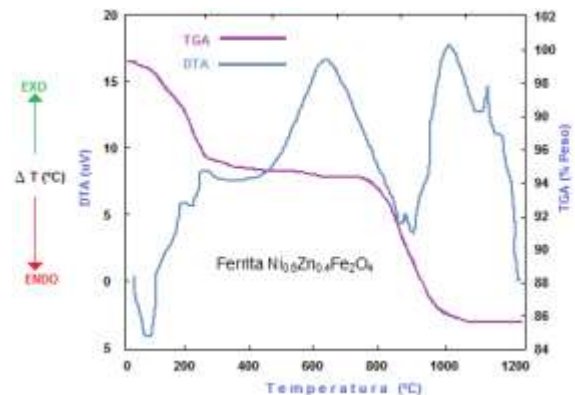
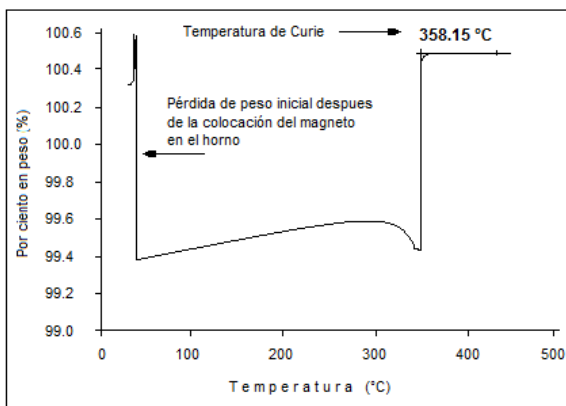


Figura 2. Gráfica de temperatura de calibración con la determinación de la temperatura de Curie para el Níquel.

Figura 3. Gráfica DTA/TGA, pérdida de peso y cambios de fase de $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

4.4 Medición en el equipo de Calorimetría Diferencial de Barrido

Para este estudio la cantidad de muestra de ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ que se utilizó para el análisis fue de 40 mg también. La calibración de la temperatura fue con estándares de Indio y Zinc, ambos tienen temperaturas de fusión diferentes 156.6°C y 419.5°C respectivamente. Simultáneamente se calibraron la línea base, la calibración de la celda y la constante de capacidad calorífica. Estos parámetros fueron útiles para la medición de la muestra y lograr ajustar la velocidad de calentamiento, frecuencia de oscilación de la temperatura y amplitud.

En esta técnica termoanalítica, la diferencia de calor entre la muestra y una referencia fue medida como una función de la temperatura. La muestra y la referencia fueron mantenidas aproximadamente a la misma temperatura durante todo el experimento. El programa de temperatura fue diseñado de tal modo que la temperatura de la muestra aumentará linealmente en función del tiempo. En tanto, la muestra de referencia tiene una capacidad calorífica bien definida en el intervalo de temperaturas en que ocurrió el barrido. La muestra experimentó una transición de fase, en ese momento comenzó a fluir calor. Al tratarse de una muestra sólida que se va a fundir, se requiere que fluya más calor a la muestra para aumentar su temperatura a la misma velocidad que la de referencia. Aquí ocurrieron dos situaciones: muestra y referencia se mantuvieron a la misma temperatura y, la absorción de calor de la muestra experimentó un proceso endotérmico.

Se determinó así la diferencia de flujo calorífico entre la muestra y la referencia. La figura 4 muestra la medición de la capacidad calorífica (CP), en la que se puede observar el comportamiento de capacidad calorífica está casi justo a la T_c . En donde el calor específico aumentó al aproximarse al valor de la temperatura en la que cambió el comportamiento ferromagnético a paramagnético.

Así, de los datos de calor específico, se obtuvo la contribución magnética del calor específico a volumen constante, C_v , el cual se puede calcular con la ecuación (1).

$$C_v = C_p - \frac{T_v \beta^2}{K_T} - C_{v_{\text{red}}} - C_e \quad \text{ecuación (1)}$$

Siendo V = volumen molar, β = coeficiente de expansión volumétrica y K_T la compresibilidad isotérmica. Para determinar la temperatura primero se calculó el calor de la muestra y el de la referencia a partir de la masa en gramos. También se consideró el calor específico promedio de Fe; Ni y Zn y el ΔT . Para esto, se consideraron como 2 sistemas a la muestra y a la referencia, ya que entre ellos hubo una transferencia de calor y así es como se pudo estimar la temperatura. Los cálculos termodinámicos involucrados en este estudio no se muestran aquí porque son demasiado amplios. Posteriormente se realizó un ajuste de la relación de C_v y C_p . La figura 5 muestra la contribución magnética del calor específico en función de la temperatura.

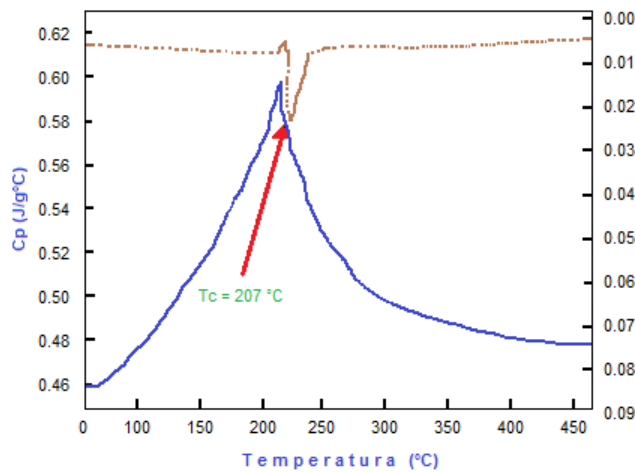


Figura 4. Medición del Calor específico C_p en función de la temperatura.

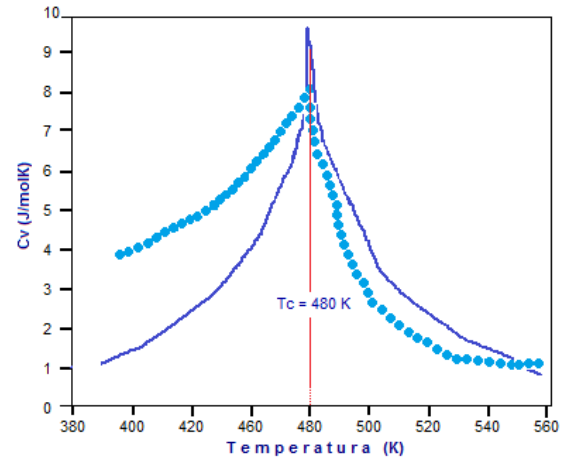


Figura 5. Contribución magnética del calor específico en función de la temperatura y la curva de ajuste.

La figura 6 exhibe el cambio de peso en función de la temperatura, la cual ocurrió cuando se llegó a la temperatura crítica, que es la Temperatura de Curie. La figura 7 exhibe el campo de resonancia en función de la temperatura.

En los materiales ferro y ferrimagnéticos el spin resultante del sistema origina un momento neto. Estas direcciones están separadas por una barrera de energía de anisotropía.

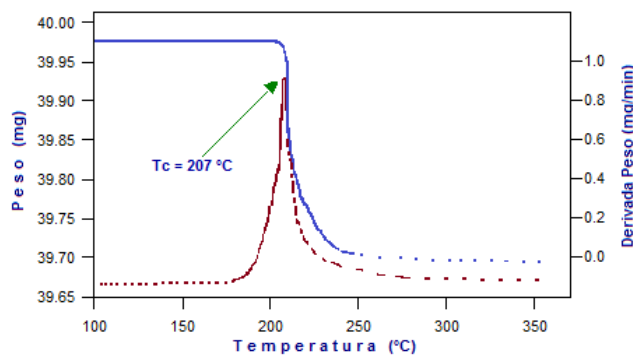


Figura 6. Medición del peso en función de la temperatura para $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

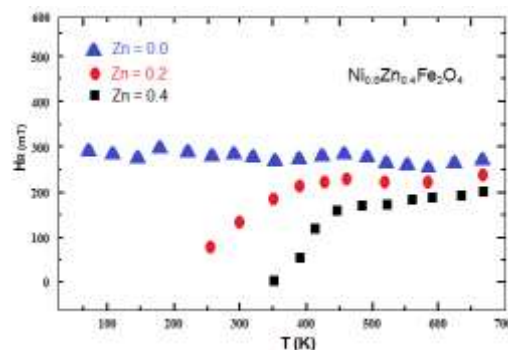


Figura 7. Campo de Resonancia (H_R) en función de la Temperatura para las muestras de ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

En este caso particular de ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$, los cristales cúbicos son estructura tipo Espinela tienen tres direcciones de fácil magnetización como lo es en las ferritas blandas. Los dominios magnéticos que se encuentran rodeados por paredes del mismo dominio; al aplicar un campo magnético externo se desplazaron las paredes de dominio y en ese momento los dominios cambiaron de dirección. En el caso de los materiales ferromagnéticos los dominios cambian hacia una sola dirección. Por lo que es posible realizar un estudio de Resonancia Paramagnética del Electrón (RPE).

En términos de la temperatura, cuando ésta es baja y el campo magnético aplicado es mayor, entonces la acción del campo supera el desorden originado por la temperatura. En el caso de que la temperatura sea alta la magnetización varía linealmente con el campo magnético. De este modo puede entenderse que la susceptibilidad magnética está en función de la temperatura y el campo.^[13] Así que la Ley de Curie mediante su ecuación trata de demostrar que la magnetización del material es directamente proporcional al campo magnético aplicado e inversamente proporcional a la temperatura y su ecuación (2) en forma sencilla es:

$$M = C \frac{B}{T} \quad \text{ecuación (2)}$$

donde:

M = magnetización resultante
 B = inducción magnética

T = temperatura absoluta en Kelvin
 C = constante de Curie

Así la ley de Curie demuestra que los materiales magnéticos tienden a ser más magnéticos al aumentar el campo y menos magnéticos al elevarse la temperatura.

Los espectros de RPE para la ferrita sintetizada $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$, fueron obtenidos en el intervalo de temperatura desde la del nitrógeno líquido (80K) hasta la temperatura de 690K. Se observó la presencia de absorción del campo cero, así como también espectros asimétricos. El ancho de la señal, el campo de resonancia y la intensidad del espectro de la resonancia magnética fueron susceptibles a las transiciones magnéticas, por lo tanto, la técnica de resonancia magnética fue muy efectiva para detectar transiciones de fase.

En el campo de resonancia en función de la temperatura de la figura 7, para las concentraciones de Zn = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5; el campo de resonancia se mantiene constante en todo el intervalo de temperatura. Pero cuando llegó a Zn = 0.6 se presentó la caída de Campo de Resonancia (H_R) a una temperatura de 480 K, determinándose así la temperatura crítica, llamada Temperatura de Curie, $T_c = 207^\circ\text{C}$.

5. Conclusiones

Se logró sintetizar un material ferromagnético con estequiometría $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ por el método de coprecipitación. El pH fue necesario mantenerlo ligeramente alcalino entre 6 y 9 para que ayudara a la precipitación del producto. La caracterización de este material fue mediante DRX de polvos. Así mismo, se realizó un ajuste del patrón de difracción por el método de Rietveld, obteniéndose los datos cristalográficos de esta ferrita; que resultó tener estructura tipo espinela $\text{A}^{2+}\text{B}^{3+}\text{O}_4$. El grupo espacial es el de una celda cubica $\text{Fd}3\text{m}$ (227). El tamaño de la celda es de 8.382 Å, con ángulos α , β y γ de 90° ; volumen de 589.05 cm³; densidad de 5.361 g/cm³; masa molar de 237.73 g/mol; color naranja de hierro.

Del comportamiento térmico de la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$, observado y analizado mediante DSC, TGA y DTA se logró determinar la Temperatura de Curie a 480 K, para este material ferromagnético. Esta ferrita estuvo atraída al imán por una interacción magnética entre ellos, haciendo que los espines de los diferentes centros metálicos se alinearan en forma paralela. Por lo que el momento magnético neto fue muy grande y la atracción sucedió en forma espontánea. Esta atracción magnética duro hasta que la temperatura fue de 207°C . Es decir, por encima de esa temperatura crítica, se rompió la atracción magnética. Dando como resultado el cambio del estado ferromagnético al

paramagnético. Así que la susceptibilidad magnética ocurre con la temperatura en materiales o sustancias ferromagnéticas, como lo es en la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ que se obtuvo.

La temperatura de Curie determinada experimentalmente para la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$ presentó un comportamiento ordenado, por lo que podría asumirse que está relacionada a la temperatura de Bloch, que está relacionada a la pared de Bloch, la cual es una región angosta del orden de los 100 Å, y es donde los momentos atómicos de los dominios magnéticos cambiaron su orientación.

Por encima de la T_c el comportamiento del campo de resonancia H_R fue el de un sistema que no posee un orden magnético. Por lo general un aumento progresivo y leve en el campo de resonancia está en concordancia con transición hacia una fase ferrimagnética, en tanto un cambio brusco en el campo de resonancia está en concordancia con una transición de fase hacia el ferromagnetismo, como lo fue en este caso particular de la ferrita $\text{Ni}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

6. Bibliografía

1. Liu C., Zou B., Rondinone A. J. y Zhang Z. J. Chemical Control of Superparamagnetic Properties of Magnesium and Cobalt Spinel Ferrite Nanoparticles through Atomic Level Magnetic Couplings, *J. Am. Chem. Soc.* 122, 6263-6267, (2000).
2. Kittel, Charles, Introducción a la física del estado sólido, 2ª. Reimpresión, Editorial Reverté, 429, 471, 503, 551, (2003).
3. Cullity, B. D. Graham, C. D. Introduction to magnetic materials, 2a. Edición, Editorial Wiley-IEEE Press, 66, (2008).
4. Jacobo S.E., Fano W.G., Razzitte A.C., Fine particles of Mn-Zn ferrites prepared by a coprecipitation method, *J. Appl. Phys.* 87 [9] 6232, (2000).
5. Sileo Elsa E., Rotelo Ramiro and Jacobo Silvia E., (2002). Nickel zinc ferrites prepared by the nitrate precursor method. *J. Phys. France, B* vol. 320/1-4, 257-260.
6. Borisova, N.M., Golubenko, Z.V., Kuzmicheva, T.G., Olkovich, L.P., Shabatin, V.P. (2012). Optimization principles for preparation methods and properties of fine ferrite materials. *J. Mag. Mater.*: 114(3), 317 - 328.
7. Dager Caballero Paola, Campis Jhonny, Uso de las Técnicas DSC y TGA en la Detección de la Transición de Fase Magnética del Níquel, Tesis de Grado, Universidad del Atlántico, (2003).
8. Connelly D. L., Loomis J. S., Map D. E., Determination of Curie Point Temperature by TGA, TA Instruments. Thermal Solutions notes TS, *Phys. Rev. B*, vol. 3 No. 3, pag. 924, (2011).
9. TA Instruments, Investigation of the Curie point by DSC, Thermal Solutions notes, TS 28, (2013).
10. ICDD Powder Diffraction File, International Centre for Diffraction Data, 12 Campus Boulevard, Newton Square, 19073-37720, (2004).
11. Pauling, Linus and Corey, Robert B. A Proposed Structure for The Nucleic Acids, *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.*; 39 (2): 84-97, (1953).
12. Koltun, Walter L. Space filling atomic units and connectors for molecular models. *U. S. Patent* 3170246, (1965).
13. Razzitte A.C., Jacobo S.E. and Fano W.G., Dielectric Response of Ni-Zn Ferrite in the RF range. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE 79- 82, (2001).

Desarrollo de una práctica de química analítica referente a una valoración potenciométrica mediante un procedimiento inusual para determinar la concentración y pureza de los constituyentes ácido-base en muestras acuosas.

Flores Valverde Erasmo, Valladares Rodríguez María Rita, Roa Limas Carlos Federico, Ángeles Beltrán Deyanira, Cerezo Clemente Joahan.

efv@azc.uam.mx , mariaritaauam@gmail.com, roalimas@gmail.com,
dab@azc.uam.mx, al2193040490@azc.uam.mx

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, Depto. De Ciencias Básicas

Av. San Pablo Xalpa 180, San Martín Xochinahuac, Azcapotzalco ,02128 Ciudad de México, CDMX

1. Resumen

Se presenta una práctica experimental por el método de potenciometría para determinar cualitativa y cuantitativamente especies ácido base utilizando una metodología inusual, esto es, proporcionando al alumno solo puntos clave omitiendo el manual tradicional. El objetivo principal de esta metodología es que el alumno obtenga un mayor desarrollo de su razonamiento analítico, en lugar de solamente seguir un protocolo.

2. Introducción

Recientemente ha surgido la inquietud de impulsar entre los estudiantes que cursan algunas de las diversas Unidades de Enseñanza Aprendizaje (UEA) de carácter experimental, razón por la cual demandan el uso de laboratorios con toda la infraestructura y equipamiento que estos espacios educativos ofrecen; así como de una metodología en la que el aprendizaje se alcance mediante la participación activa del alumno.

Fundamentalmente se propone en principio para el alumnado que cursa las licenciaturas de Ingeniería Química e Ingeniería Ambiental. De manera muy particular es esta oportunidad que se propone para la UEA “Técnicas de Medición y Composición”.

Al respecto y en cuanto a las teorías del aprendizaje deben considerarse las dos principales escuelas que abordan la forma de aprender de las personas, toda vez que una de éstas corresponde a la Conductista, que indica que el aprendizaje se logra mediante estímulos, respuestas y recompensas,

calificándolos como factores de entrada; en tanto que a las respuestas las califica como comportamientos aprendidos, gravitando -estas aportaciones- entre psicólogos que destacan en esta corriente con contribuciones como las de Skinner. (Díaz, 1999).

La segunda gran escuela es la Cognitivista, una teoría psicológica cuyo objeto de estudio es cómo interpreta la mente, cómo procesa y almacena la información en la memoria. Es decir, que centra su atención en la forma en que la mente humana piensa y aprende, a través de la percepción, la memoria y la formación de conceptos; y de forma destacada, en la capacidad para desarrollar habilidades que manifiestan la comprensión de lo que se ha aprendido mediante la atención y solución de retos, desafíos o problemas que se deban enfrentar (Díaz, 1999).

En este orden de ideas, la Creatividad es otro de los rubros que nutren los procesos de comprensión, pues resulta imprescindible crear para comprender. Es así que la Creatividad se puede propiciar a través de la generación de ideas o competencias propositivas, alternativas, proposiciones, diseño y ejecución de proyectos, prototipos, modelos, campañas, analogías, dramatizaciones, representaciones, estructuración de procesos y procedimientos con el consecuente desarrollo y perfeccionamiento de habilidades, destrezas, aptitudes, análisis, observación y acciones concluyentes que conduzcan a la constitución de competencias creativas (Arboleda, 2014).

En cuanto a esta propuesta metodológica es posible afirmar que está enfocada en la realización de un proceso de investigación por parte del estudiante, con el propósito de informarse en la referencias y la bibliografía correspondientes a los fundamentos técnicos y científicos de los elementos y compuestos químicos que constituyen la UEA teórico experimental de “Técnicas de Medición de Composición”, específicamente; así como de los procedimientos y actividades experimentales de laboratorios inherentes a los objetivos educativos y los contenidos programáticos que conforman este curso (Díaz, 1999).

Como ya se indicó anteriormente, para este trabajo se consideraron algunos de los postulados de las corrientes pedagógicas que contribuyen a la adquisición de conocimientos, destrezas y habilidades desarrolladas por el alumnado con la finalidad de alcanzar un aprendizaje holístico donde converjan los aspectos teóricos y los de actuación manual; así como el manejo de aparatos, herramientas y equipo de laboratorio (Díaz, 1999).

Esta integración de carácter cognitivo, puede tener una gran cimentación en el Constructivismo, donde la consecución del conocimiento se apoya en los antecedentes cognitivos del educando, quien va estructurando nuevos aprendizajes en este orden de ideas, al considerar que el aprendizaje obedece a un proceso constructivo interno, autoestructurante, un tanto subjetivo y personal. Conviene tener en cuenta que este desarrollo cognoscitivo de (re)construcción de saberes culturales que se facilitan con la interacción de aspectos como el social y el cooperativo, a través de lo cual se logra conformar una metodología que se desarrolla de manera colaborativa, tornándose en un aprendizaje basado en proyectos en los que los educando se enfrentan a situaciones que los conducen a plantear propuestas creando ambientes de aprendizaje facilitados con apoyos que

brindan la construcción de puentes cognitivos entre lo nuevo y lo familiar, con la participación de materiales de aprendizaje potencialmente significativos (Arboleda, 2014).

Estas estrategias de aprendizaje se cifran en procedimientos, etapas, operaciones y habilidades, lo que todo sujeto con capacidad para aprender empieza consciente, controlada e intencionalmente, como elementos flexibles para aprender significativamente y, solucionar problemas asertivamente (Díaz, 1999).

Entre otros principios pedagógicos que apuntalan la metodología propuesta, Paulo Freyre señala que “los aprendices deben ser participantes activos en los programas de aprendizaje; y agrega que la experiencia debe resultar significativa para el aprendiz; y que el aprendizaje debe estar orientado en sentido crítico” (Arboleda, 2014).

El presente trabajo trata de demostrar una forma más efectiva de aprendizaje convocando al educando a pensar más en lo que puede suceder durante el proceso químico, que a seguir las instrucciones de un manual como se hace en el método convencional (Vázquez, 2010).

La estructura de una de las prácticas se muestra a continuación, como parte del curso de técnicas de Medición de Composición que se imparte a los alumnos de Ingeniería Química en la UAM (A).

3. Desarrollo experimental

Desarrollo de una valoración potenciométrica mediante un método inusual

No se cuenta con un instructivo como en el método convencional solo se cuenta con los puntos clave. Para la siguiente sesión cada equipo de alumnos entregará un reporte de lo que hizo, como lo hizo y porque lo hizo o sea ahora el INSTRUCTIVO ellos lo construyen, el grupo observa que las condiciones experimentales son distintas para cada muestra el profesor pone énfasis en reconocer que ellos han elaborado el manual (Principio de elaboración de un proyecto ejecutivo) que se aplica para analizar la muestra que recibieron, la práctica así desarrollada proporciona al alumno una idea más amplia de cuál sería el camino para el análisis de una muestra determinada que es a lo que se enfrentarán en su vida profesional.

- Título de la práctica: “ Valoración potenciométrica de especies ácido base ”
- Puntos clave para el desarrollo de la práctica, son los pasos principales para obtener resultados satisfactorios en la realización de la práctica. El profesor explica previa y brevemente cada punto clave y lo reafirma frente al experimento y frente al alumno durante el desarrollo de la práctica.
- a). Recepción de la muestra en esta práctica sólo se trabaja con muestras ácidas, las muestras son diferentes para cada equipo de trabajo: ej. ácido fuerte, ácido débil, ácido diprótico, mezcla de ácido débil y ácido fuerte, ácido débil diprótico y su sal monosódica, dos ácidos fuertes.

- b). Instalación del equipo: mostrar sobre una mesa de laboratorio la forma como se instala el equipo indicando las partes de mayor aplicación en la práctica.

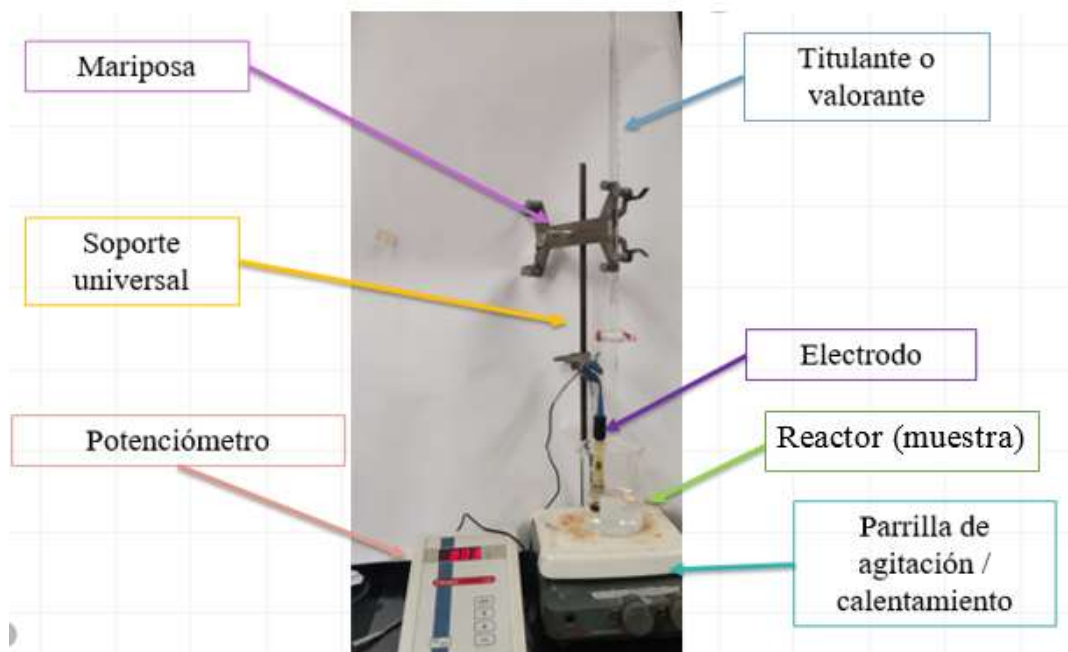


Figura 1. Equipo para valoración potenciométrica

- c). Selección del titulante (ácido o base) reactivos preparados en una práctica anterior o sea que el alumno se de cuenta que la práctica de hoy ya se inició desde la sesión anterior.
- d). Selección del tamaño de la muestra (volumen) de la muestra
- Se selecciona desarrollando un escalamiento, es decir se inicia valorando muestras pequeñas y conforme al volumen del titulante gastado se calcula el volumen adecuado de la muestra poniendo como premisa un gasto de aproximadamente 1/2 del volumen de la bureta (que el gasto no sea tan pequeño ni tan grande) (CNA, UAM-A).
- e). Inicio de la valoración: registrar el pH para cada volumen adicionado ej. cada 0.5 mL.
- f). Término de la valoración: El volumen gastado para cada equipo es diferente puesto que las muestras son diferentes, pero se pone énfasis en que toda valoración termina cuando el pH en el reactor es semejante al pH del titulante considerando la dilución ya efectuada por las condiciones del experimento.

- g). Conclusiones (individuales)
- h). Resultados y cálculos
- i). Cuestionario
- j). Bibliografía.
- Nombre y firma del equipo

Observación

- De esta práctica se obtiene material para la siguiente clase teórica: Los alumnos llevarán elaboradas las gráficas: gráfica clásica pH versus mL de titulante, primera derivada ΔpH versus mL de titulante. Se discute el significado de la forma de las gráficas y se aplican las fórmulas para calcular la concentración y cuando aplique la pureza (fraudes en la química) del analito entre otros conceptos como punto de equivalencia pH de mezclas, etc.

Se pueden obtener gráficas como las que se muestran en la Figura 1.

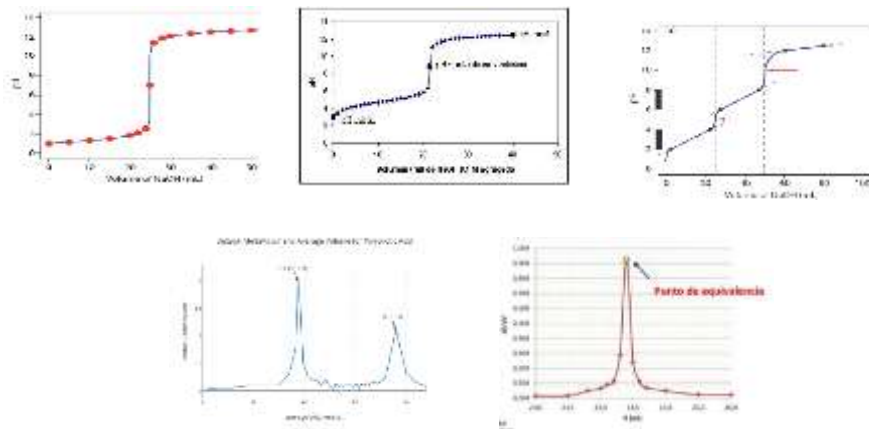


Figura 2. Gráficas pH vs mL del titulante, y primera derivada $\frac{\Delta pH}{mL}$ vs mL del titulante.

Estas gráficas se aprovechan para explicar a los alumnos con cuál de ellas se obtienen los puntos de equivalencia más exactos.

Ejemplo: resultados de una práctica inusual por potenciometría.

El alumno recibe la muestra de 100 mL y quien la entrega le solicita un análisis de la concentración de ácido fosfórico.

Paso 1). Montar el equipo y tener el titulante que en este caso es solución de NaOH 0.05 N

Paso 2). Seleccionar el volumen de la muestra, se miden 5 mL de muestra se colocan en el reactor se le agrega agua suficiente para que el electrodo se cubra y haga posible las lecturas, se pone un

agitador magnético, se registra el pH a volumen de titulante cero, el titulante se coloca en una bureta de 25 ml , se agregan los primeros 0.5 mL y registra el pH, se sigue agregando el titulate y a cada adición de 0.5 mL se registra el pH, la valoración termina cuando el pH en el reactor se hace aproximadamente constate (se registran unas 6 lecturas) y debe ser más grande que el pH del titulante solo.

Paso 3). En este primer experimento se gastaron 2.5 mL y el pH subió cercano a 12 lo que significa que la muestra debe ser más grande, entonces se inicia el escalamiento

El volumen adecuado de muestra se obtiene de la siguiente ecuación.

$$\text{mL muestra} = 12.5 \text{ mL titulante} \times 5 \text{ mL muestra} / 2.5 \text{ mL muestra} = 25 \text{ mL muestra}$$

Por consiguiente el volumen adecuado y que va a gastar de titulante aproximadamente la mitad de la bureta son cuando en el reactor se coloquen 25 mL de muestra.

Paso 4). Cálculos de la concentración del analito.

4.a) Cálculo de la concentración del analito cuando es puro

Con los datos de la valoración se obtienen las gráficas de pH versus mL de titulante, y delta pH/delta mL versus mL de titulante, se observan dos puntos de equivalencia uno a 11 mL y otro a 22 mL del titulante significa que se trata de una solución de ácido fosfórico con una pureza cercana a 100% si el segundo punto de equivalencia hubiera sido mayor a 22 mL significa que el ácido fosfórico no tiene 100% de pureza

La concentración de ácido fosfórico (analito) se calcula como sigue:

$$mg_{analito} = mL_{titulante} \times N_{.deltitulant} \times peso\ equivalente\ analito$$

$$mg_{analito} = 11 \times 0.05 \times 98 = 53.9 mg_{analito}$$

$$\frac{mg_{analito}}{L} = \frac{53.9 mg_{analito} \times 1000 mL_{muestra}}{25 mL_{muestra}} = 2156 \frac{mg\ analito}{L\ muestra\ original}$$

$$\frac{moles_{analito}}{L} = 2156 \frac{mg\ analito}{L} \times \frac{un\ mol\ de\ analito}{PM\ analito\ (mg)98000} = 0.022 M$$

La muestra es una solución de ácido fosfórico 0.022 molar.

4.b) Cálculo de la concentración del analito cuando existe una contaminación

Cuando se elaboran las gráficas se registran dos puntos de equivalencia, uno cuando se han gastado 11 mL de titulante y el otro cuando se han gastado 32 mL esto significa que existen dos especies químicas una de ellas corresponde al ácido fosforico y la otra a su sal monosódica correspondiente,

entonces es necesario informar la concentración de las especies encontradas en la muestra y se aplican las siguientes ecuaciones

La concentración de ácido fosfórico (analito) se calcula como sigue:

$$mg_{analito} = mL_{titulante} \times N_{deltitulante} \times peso\ equivalente\ analito$$

$$mg_{analito} = 11 \times 0.05 \times 98 = 53.9 mg_{analito}$$

$$\frac{mg_{analito}}{L} = \frac{53.9 mg_{analito} \times 1000 mL_{muestra}}{25 mL_{muestra}} = 2156 \frac{mg\ analito}{L\ muestra\ original}$$

$$\frac{moles_{analito}}{L} = 2156 \frac{mg\ analito}{L} \times \frac{un\ mol\ de\ analito}{PM\ analito\ (mg)98000} = 0.022M$$

Para calcular la concentración de la sal monosódica del ácido fosfórico (analito) se aplican las siguientes ecuaciones:

$$mg\ sal = mL_{titulante} \times N_{deltitulante} \times peso\ equivalente\ de\ la\ sal$$

$$mg\ sal = (32 - 11) \times 0.05 \times \frac{120}{2} = 63\ mg\ sal$$

$$\frac{mg\ sal}{L} = \frac{63\ mg\ sal \times 1000 mL_{muestra}}{25 mL_{muestra}} = 2520 \frac{mg\ sal}{L\ muestra\ original}$$

$$\frac{moles\ sal}{L} = 2520 \frac{mg\ analito}{L} \times \frac{un\ mol\ de\ analito}{PM\ analito\ (mg)120\ 000} = 0.021M$$

Ventajas de este método Inusual

- Mediante este método hay una interacción muy estrecha profesor-alumno generada por los resultados de las lecturas y cambios de pH que el alumno está obteniendo durante la práctica.
- Mediante este método se explica a los alumnos que lo que están haciendo es una investigación para la implementación de un método analítico por titulación (no potenciométrico) utilizando indicadores, ya que las gráficas que obtienen muestran intervalos de pH que corresponden a los puntos de equivalencia y conociendo el vire de los indicadores ácido base se pueden aplicar para desarrollar un método analítico por titulación utilizando indicadores, siendo que los métodos convencionales al alumno solo se le indica que siga el instructivo.

- Como cada equipo de alumnos trabaja una muestra diferente se obtienen diferentes resultados y con éstos se pueden obtener diferentes gráficas que brindan la oportunidad al profesor de dar una explicación más amplia sobre el tema.
- Como cada equipo tiene una muestra diferente su atención la fija en el análisis de su muestra y esto propicia que el alumno adquiera seguridad y responsabilidad en los resultados que obtiene y que reporta.
- El alumno aprende a elaborar protocolos y adquiere la estructura de pensamiento que le permitirá desarrollar métodos analíticos en su desarrollo profesional, toda vez que se ha mencionado que para la siguiente sesión cada equipo de alumnos entregará un reporte de lo que hizo, como lo hizo y porque lo hizo.

Desarrollo experimental método convencional

- Todos los alumnos realizan la misma práctica siguiendo un instructivo.
- Todos los alumnos analizan la misma muestra, usan la misma cantidad de reactivos y los mismos tiempos de reacción y obtienen los mismos productos.
- Entregan un reporte de la práctica y la estructura de este es igual o semejante para todos.
- El alumno aprende a seguir instrucciones y tiene poca oportunidad de analizar porque en el instructivo se piden, por ejemplo, volúmenes de muestra, volúmenes de titulante tiempos de reacción, utilizar ciertos indicadores, etc.
- El alumno se queda con la idea de que todas las muestras que contienen dichos analitos se analizan de la misma forma
- Por el diseño de las prácticas la explicación del tema se limita a una misma explicación para todos los equipos.
- Todos los resultados son iguales.
- Mediante este método el alumno sigue instrucciones, tiene poca posibilidad de reflexionar porque la metodología limita la creatividad.

4. Resultados y discusión

El alumno obtiene un aprendizaje con un mayor alcance, debido a que debe mantener su atención en el análisis de su muestra, ya que por las características de ésta no puede guiarse por los resultados de sus compañeros en la siguiente sesión, es parte importante la discusión de resultados de cada una de las gráficas obtenidas durante la práctica por cada equipo de trabajo, aplicando el método inusual, situación que no es posible en el método convencional porque todos analizan una misma muestra.

Ejemplo: De estas dos gráficas si se analiza su forma se puede concluir lo siguiente.

a) La Figura 2. corresponde a un ácido fuerte.

b) La Figura 3. corresponde a un ácido débil.

El método inusual propuesto, efectivamente

c) En ambas figuras en la parte donde el pH cambia bruscamente ΔpH , dicho cambio brusco del pH es de utilidad para proponer los indicadores ácido-base adecuados en un método volumétrico ordinario (sin usar el potenciómetro).

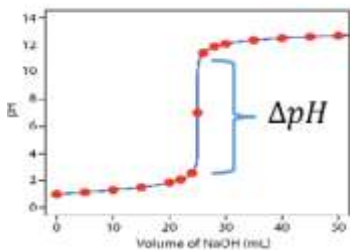


Figura 3. Gráfica pH vs mL del titulante de un ácido fuerte.

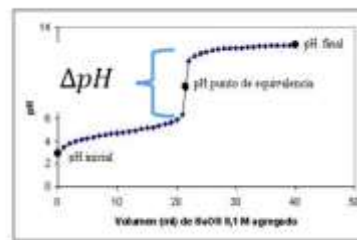


Figura 4. Gráfica pH vs mL del titulante de un ácido débil.

d) En cuanto al punto de equivalencia la forma más exacta es el que se obtiene por la primera derivada, figuras 4 y 5.



Figura 5. Gráfica ΔpH vs mL del titulante de un ácido fuerte.

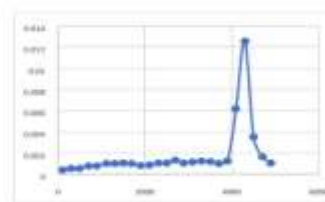


Figura 6. Gráfica ΔpH vs mL del titulante de un ácido débil.

e). Cuando el analito que se busca es un ácido diprótico las gráficas son las siguientes:

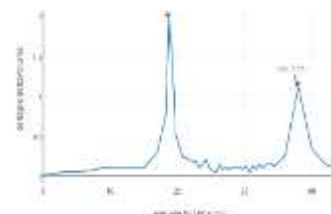
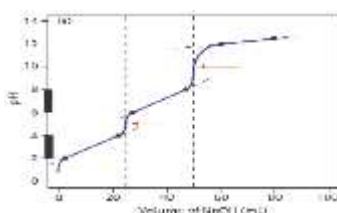


Figura 7. Gráfica pH vs mL del titulante de un ácido diprótico.

Figura 8. Gráfica ΔpH vs mL de titulante de un ácido diprótico.

g) De acuerdo a la figura 7. Se pueden observar dos puntos de equivalencia. En la figura 8. Se observa que el primero es cuando se gastan 21 mL de titulante y el segundo es cuando se gastan 42 mL de titulante, siendo la muestra una solución de ácido fosfórico, conforme a los puntos de equivalencia en donde los gastos del titulante son iguales se puede concluir que el ácido fosfórico agregado a la solución es un ácido de alta pureza. En caso de que el volumen del titulante del segundo punto de equivalencia fuera mucho mayor que el primero significa que el ácido fosfórico está mezclado con su sal mono sódica correspondiente.

5. Conclusiones

Conforme a las gráficas que el alumno puede obtener mediante esta práctica inusual puede observarse que están involucrados una serie de conceptos como: punto de equivalencia, utilidad del ΔpH , pureza del analito, formación de sistemas reguladores del pH durante la titulación, ecuación para calcular el pH antes del punto de equivalencia, en el punto de equivalencia y después del punto de equivalencia. La ventaja de esta práctica inusual es que hay una fuerte interacción profesor-alumno y que cada concepto es explicado por el profesor en forma individual lo que permite un razonamiento más amplio por parte del alumno.

La discusión acerca del método inusual difícilmente se puede aplicar cuando la práctica se lleva a cabo por el método convencional, ya que en este método la muestra problema normalmente es igual para todo el grupo.

Es importante señalar que eventualmente en el método inusual se tienen que usar fórmulas y gráficas que se usan en el método convencional, sin embargo sí hay una gran diferencia en la forma en que le llegan al alumno, esto es, en el método inusual las obtiene el propio alumno y las comparte con el grupo en la discusión después de un registro de datos que va generando y comprendiendo durante la práctica, mientras que en el método tradicional esto es más difícil aplicar, toda vez que normalmente es una misma muestra para todos.

6. Bibliografía

1. Arboleda, J.C. (2014). Estrategias para la comprensión significativa. Didácticas Cognoscitivas y Socioafectivas. Neisa. Nueva Editorial Iztaccíhuatl, México.
2. Díaz Barriga, F. (1999). Estrategias docentes para un aprendizaje significativo. Una interpretación constructivista. Editorial: MCGRAW-HILL, México.
3. Robinson, K. A. (2000). Análisis instrumental. España: Pearson Educación.
4. Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., Crouch, S. R. (2005). Fundamentos de química analítica. España: Ediciones Paraninfo, S.A.

5. Vázquez, R. F. (2010) Estrategias de enseñanza. Editorial Kimpres Ltda., Bogotá, D.
6. Séptimo ejercicio de intercalibración (1999). Comisión nacional del agua (CNA), Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A).

Construcción de ecuaciones químicas: Un método universal

Herrera Becerra, AA¹, Prieto Meléndez, R¹, Calva Olmos, VG¹, Padrón Godínez, A¹

¹Grupo de Modelado y Simulación de Procesos, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México

alberto.herrera@icat.unam.mx, rafael.prieto@icat.unam.mx,

gerardo.calva@icat.unam.mx, alejandro.padron@icat.unam.mx

1. Resumen

El objetivo principal de este artículo es ayudar a propagar el conocimiento de la Estequiometría de las Reacciones Químicas (Chemical Reaction Stoichiometry en inglés) entre los colegas latinoamericanos. La Estequiometría de las Reacciones Químicas es un método universal que permite construir una ecuación química a partir del conocimiento empírico de las entidades químicas que participan en la reacción. Para ello, en este trabajo presentamos los conceptos teóricos fundamentales en los que se basa la estrategia y usamos un ejemplo tomado de la literatura química para ejemplificar las ventajas de la estrategia en la construcción de ecuaciones químicas.

2. Introducción

En su concepción original en el siglo XVIII ^[1], el término estequiometría se usó para designar los métodos de identificación de las sustancias elementales con las que se forman las sustancias materiales. Este uso comenzó a cambiar en las primeras décadas del siglo XX, y ya para la mitad de ese siglo el término estequiometría se usó para referirse a las condiciones que debe satisfacer un sistema químico reaccionante para poder describir los cambios de composición que ocurren en la reacción química, véase, por ejemplo, el artículo de G. W. Bennett de 1954 ^[2]. Así pues, durante la segunda mitad del siglo XX, y en lo que va del siglo XXI, la estequiometría se entiende como el conjunto de todas las técnicas de cálculo de la composición de un sistema químico ^[3]. Debido a esto, muchos autores se refieren a la estequiometría como una especie de “contabilidad” de los componentes materiales de los sistemas químicos.

En los cálculos estequiométricos son de fundamental importancia las relaciones entre las cantidades de las especies químicas de un sistema químico particular. Estas

relaciones se expresan en la forma de ecuaciones químicas. El concepto de ecuación química se comenzó a introducir en la literatura química desde el siglo XVIII, y la forma actual comenzó a establecerse en el siglo XIX (una revisión histórica muy interesante se encuentra en un artículo de D. Kolb de 1978 ^[4]); la forma contemporánea de la ecuación se describe en el llamado “Libro Verde” (“Green Book”) de la IUPAC ^[5].

Una ecuación química es una representación compacta y simbólica de información química obtenida experimentalmente; dicho esto de otra manera, la ecuación química es un resumen parcial de información experimental. Así, una ecuación química debe tener un significado explícito, pero también se debe entender que hay información química que no se señala en la ecuación. Con base en estas virtudes y limitaciones, los químicos e ingenieros químicos usan las ecuaciones químicas para realizar muy diversos cálculos químicos acerca de la composición de un sistema químico. Claramente, una ecuación química tiene una gran importancia en las investigaciones químicas. Sin embargo, podrá parecer sorprendente que todavía en la actualidad se observen con cierta frecuencia usos descuidados del concepto de ecuación química en la literatura química.

De inmediato se presenta un problema fundamental: ¿cuál es la información química que es necesario tener para poder construir una ecuación química significativa? La respuesta puede parecer obvia, pero sorprendentemente no siempre es reconocida. Se debe contar con *información experimental* sobre las entidades químicas involucradas en la reacción (y que realmente han sido detectadas), así como las fórmulas moleculares de dichas entidades, escritas en términos de las sustancias elementales que las forman. El concepto de entidad química será aclarado un poco más adelante. Las fórmulas moleculares constituyen la primera parte de la información que se incorpora en la ecuación química. Después se deben establecer las ecuaciones de conservación de las masas elementales; o, dicho de otra manera, se hace uso del principio de conservación de las masas elementales en una reacción química. Este aspecto de la construcción de la ecuación química fue propuesto originalmente en 1878 ^[6]. La solución de las ecuaciones de conservación permite establecer el balance de masa de la reacción química, y ésta es precisamente la otra parte de la información que se expresa en la ecuación química. Todos estos cálculos se han conocido coloquialmente como el “balanceo” de la ecuación química. Así, la construcción de la ecuación química, o el balance como usualmente se le denomina, es un proceso matemático, por lo general, nada trivial.

Durante las primeras seis décadas (aproximadamente) del siglo XX, pocos investigadores químicos fueron conscientes de la naturaleza matemática del problema de “balanceo”, y de su dificultad intrínseca. En vano, muchos investigadores trataron de inventar métodos simples (los cuales sólo resultaron útiles para ciertos casos particulares), o trataron de resolver el problema recurriendo (casi) exclusivamente a una heurística química. Esto último originó los métodos heurísticos de “balanceo” conocidos como “números de oxidación” (antes “cambio de valencia”) o “medias reacciones” (antes “ion-electrón”). Con el paso de los años, se mostró repetidas veces que este enfoque heurístico era muy desafortunado para la enseñanza de los principios químicos, ya que, por lo general, los estudiantes no contaban con la experiencia química necesaria. Adicionalmente, dichos métodos se basaban en suposiciones químicas que no siempre tenían bases experimentales y/o teóricas sólidas.

3. El problema de construcción de ecuaciones químicas

En una revisión de la literatura química se encuentra que, durante la primera mitad del siglo XX, muchos autores hicieron uso de un enfoque netamente matemático para construir ecuaciones químicas, pero no lograron convencer a sus colegas ni de la naturaleza matemática intrínseca del problema, ni de las ventajas de emplear métodos matemáticos generales (nuevamente, véase el artículo de G. W. Bennett de 1954 ^[7] como un caso típico de la época). Los métodos que emplearon tales autores se conocieron como los métodos algebraicos o métodos de coeficientes indeterminados; hay que decir, sin embargo, que los métodos fueron propuestos de una manera muy informal, lo cual dificultaba su asimilación. Esta situación comenzó a cambiar en los 1960, época en la que muchos químicos e ingenieros químicos, con una mayor preparación matemática, comenzaron a reconocer los fundamentos matemáticos del problema de construcción de ecuaciones químicas y comenzaron a proponer métodos más rigurosos para enfrentar el problema. El resultado fue el reconocimiento de que el problema de construcción consiste en la resolución de un conjunto de ecuaciones lineales, véase, por ejemplo, el artículo de R. Haas y K. H. Gayer de 1962 ^[8]. Hecho este reconocimiento, muy rápidamente se estableció que el problema debía ser resuelto aplicando los métodos del álgebra lineal.

Así, en 1979, Ronald W. Missen y William R. Smith dieron a conocer una estrategia universal para construir ecuaciones químicas a partir únicamente del conocimiento experimental de las especies químicas que se ha detectado que participan en una reacción química; en esa época denominaron a su estrategia simplemente Estequiometría Química (Chemical Stoichiometry en inglés) ^[9]. Con el paso de los años, estos autores fueron fortaleciendo las bases teóricas y los métodos de implementación computacional de su estrategia, hasta que hacia el final de la década de los 1990 decidieron renombrarla Estequiometría de las Reacciones Químicas (Chemical Reaction Stoichiometry en inglés) ^[10]. Desafortunadamente, esta estrategia general todavía no es ampliamente conocida ni en la Química General ni en las diversas ramas de las Químicas Aplicadas.

En este contexto, el objetivo principal de este artículo es ayudar a propagar el conocimiento de la Estequiometría de las Reacciones Químicas entre los colegas latinoamericanos. Para ello, en este trabajo presentamos los conceptos básicos en los que se basa la estrategia y usamos un ejemplo tomado de la literatura química para ejemplificar las ventajas de la estrategia en la construcción de ecuaciones químicas.

3.1 Conceptos básicos

Las definiciones que se presentan en esta sección se han tomado y adaptado del artículo de Missen y Smith de 1998 ^[11]. El concepto fundamental que se va a usar en lo que resta del documento es el de *sistema químico*. Su caracterización comienza considerando N entidades químicas $A_1, \dots, A_N$ distinguibles. Cada una de esas entidades químicas A_i se describe por medio de su llamada *fórmula molecular*, la cual es una secuencia finita de símbolos químicos de la forma general:

$$A_i = X^1_{a_{1i}} \cdots X^l_{a_{li}} \cdots X^M_{a_{Mi}}, \text{ para } i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

donde cada componente $X^j_{a_{ji}}$ corresponde a la cantidad a_{ji} de veces que se encuentra el elemento X^j , para $j = 1, \dots, M$, en la entidad A_i . Existen varias convenciones para escribir las fórmulas moleculares de manera más compacta, pero estas no van a ser consideradas en este documento (véase nuevamente el “Libro Verde” de la IUPAC [12]).

Por ejemplo, la entidad química amoníaco, formada con los elementos N y H en este orden, tiene la fórmula molecular N_1H_3 . Si se consideran ahora los elementos N, H y O en este orden, entonces la fórmula molecular del amoníaco es $N_1H_3O_0$.

El concepto de especie química va a permitir distinguir una entidad química de otras entidades. Así, una *especie química* se caracteriza por:

- (1) su fórmula molecular; o, si lo anterior no es posible, por
- (2) su estructura molecular (e. g., para distinguir formas isoméricas con la misma fórmula molecular); o, si todo lo anterior no se cumple, por
- (3) la fase en la que se encuentra la entidad.

La última característica permite afirmar que $H_2O_1(l)$ es una especie diferente de $H_2O_1(g)$.

En muchas situaciones prácticas no es necesario hacer una caracterización tan detallada de las entidades químicas; en estos casos se recurre al concepto de sustancia química. Así, una *sustancia química* es una entidad química distinguible por las características (1) y (2) anteriores, pero no por la característica (3). Por ejemplo, $H_2O_1(l)$ y $H_2O_1(g)$ son una misma sustancia química, agua.

En las secciones iniciales de este documento, el término sistema químico fue tratado de una manera muy intuitiva; ahora es conveniente introducir una definición más formal. Así, por un *sistema químico* se va a entender una colección ordenada de especies químicas y elementos especificados en términos de una secuencia finita de N especies químicas y una secuencia finita de $\bar{M}$ miembros que incluyen a los M elementos químicos con los que se forman las especies del primer conjunto ordenado y otros miembros que se especifican un poco más adelante. Esto es, un sistema químico S es el conjunto:

$$S = \{(A_1, A_2, \dots, A_N), (E_1, E_2, \dots, E_{\bar{M}})\}. \quad (2)$$

Cada especie química se especifica por medio de su fórmula molecular, junto con designaciones estructurales y de fase, si es necesario. La lista de elementos químicos debe incluir a:

- (1) cada isótopo involucrado en un intercambio isotópico.

Si es necesario, en dicha lista además se incluye:

- (2) la carga protónica p si se encuentra involucrada una especie iónica; y
- (3) una designación de la forma $X_1, X_2, \dots$ para cada sustancia inerte considerada.

Por una sustancia inerte se debe entender una sustancia que forma parte del sistema pero que no participa en algún cambio fisicoquímico.

3.2 Estequiometría de las reacciones químicas

De manera general, en un sistema químico constituido por N especies químicas diferentes, las cuales se forman a partir de M especies elementales diferentes, la fórmula molecular de cada especie química se puede resumir con los números enteros positivos a_{ki} , para la especie k , considerando el elemento i . Claramente, los números a_{ki} corresponden a la cantidad de veces que aparece el elemento i en la especie química k . Con esto, la ecuación de balance de las masas elementales toma la forma:

$$\sum_{i=1}^N a_{ki} n_i = b_k, \text{ para } k = 1, \dots, M. \quad (3)$$

En este conjunto de ecuaciones lineales, las incógnitas $n_i, i = 1, \dots, N$, (en moles) son las cantidades (o abundancias) de las especies químicas, mientras que las constantes $b_k, k = 1, \dots, M$, (en moles) son las cantidades de las especies elementales. No es difícil mostrar que si se consideran cantidades de referencia n_i^0, b_k^0 , las ecuaciones anteriores se reducen a:

$$\sum_{i=1}^N a_{ki} \delta n_i = 0, \text{ para } k = 1, \dots, M. \quad (4)$$

En este caso, δn_i es el cambio de cantidad de la especie i .

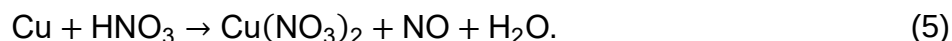
La solución del conjunto de ecuaciones lineales (4) se puede obtener usando el método de reducción de Gauss-Jordan (véase, por ejemplo, el libro ^[13]).

De manera sucinta, el método de reducción de Gauss-Jordan se basa en las acciones siguientes. Se considera un ejemplo de un conjunto de cuatro ecuaciones lineales con cinco incógnitas, como el que será analizado un poco más adelante. Primero se lleva a cabo lo que se denomina una reducción de Gauss, lo cual quiere decir que, para empezar, se reduce el conjunto de cuatro ecuaciones con cinco incógnitas a un conjunto de tres ecuaciones con cuatro incógnitas; la reducción se realiza sumando un múltiplo apropiado de una de las ecuaciones a las tres restantes, cuidando que en estas ecuaciones se elimine una misma incógnita. El conjunto resultante se reduce a su vez a un conjunto de dos ecuaciones con tres incógnitas; finalmente, el último conjunto se reduce a una ecuación con dos incógnitas. En segundo término, se procede a hacer lo que se denomina una sustitución hacia atrás, lo cual quiere decir lo siguiente. Debe ser claro que en la última ecuación que se obtiene del proceso de reducción, si se asigna un valor arbitrario a una de las dos últimas incógnitas, la incógnita restante queda determinada. Con dos incógnitas ya determinadas se puede determinar el valor de la tercera usando la penúltima ecuación. Similarmente, con tres incógnitas ya determinadas, se obtiene el valor de la cuarta incógnita usando la segunda ecuación. Y, finalmente, con cuatro incógnitas determinadas, se obtiene el valor de la quinta incógnita usando la primera ecuación. El proceso de Gauss-Jordan combina la reducción con la sustitución hacia atrás, con lo cual los valores de las incógnitas se obtienen directamente del último conjunto reducido.

4. Construcción de una ecuación química

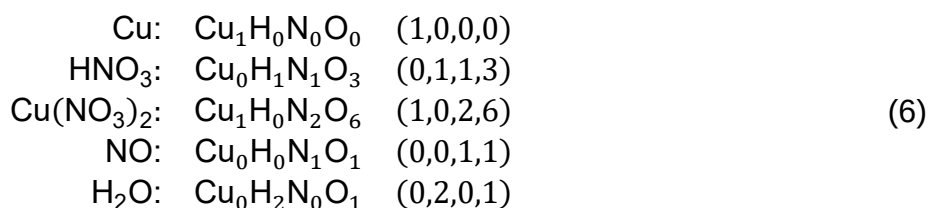
En una carta al editor del Journal of Chemical Education publicada en el número de diciembre de 1931 ^[14], A. W. S. Endslow menciona que la construcción de una ecuación química que describe la reacción del cobre metálico con el ácido nítrico fue resuelta por uno de sus estudiantes usando un método (desconocido para el autor) basado en la solución de un sistema de ecuaciones lineales. La solución del sistema de ecuaciones se obtuvo por medio de un razonamiento informal, basado en la forma del conjunto de ecuaciones lineales y asumiendo que una de las incógnitas tomaba un valor preestablecido. A continuación, se reproduce este problema, pero usando la estrategia de la Estequiometría de las Reacciones Químicas.

Se considera un sistema químico formado por las especies Cu, HNO₃, Cu(NO₃)₂, NO y H₂O, en este orden. Experimentalmente se ha determinado que las especies químicas anteriores participan en una reacción química de la forma:



Es conveniente aclarar que la expresión anterior no es una ecuación química, simplemente es una expresión basada en fórmulas moleculares con la que se indica una posible reacción química; en la literatura química, una expresión como la anterior suele denominarse esqueleto de ecuación química. El problema que se plantea ahora es construir una verdadera ecuación química que describa los cambios materiales que se presentan en la reacción química; se debe recordar que muchas de las condiciones experimentales en las que ocurre la reacción química no se van a incluir en la ecuación química.

Se construye un conjunto de ecuaciones lineales que se basa en la conservación de las especies elementales que forman a las especies reaccionantes. Para la construcción, primero es necesario establecer las fórmulas moleculares de las especies químicas Cu, HNO₃, Cu(NO₃)₂, NO y H₂O, considerando los elementos Cu, H, N, O con los que se forman. Dichas fórmulas moleculares son las siguientes:



La primera columna corresponde a las fórmulas moleculares en la notación convencional; en este caso, se puede decir que estas son las fórmulas simplificadas. La segunda columna corresponde a las fórmulas moleculares extendidas, esto es, mostrando explícitamente a todas las sustancias elementales consideradas. Los arreglos numéricos de la última columna corresponden a los subíndices de las fórmulas moleculares extendidas. Para los fines de este artículo, esta es una descripción informal y no debe ser interpretada como un vector. En un artículo posterior describiremos de manera más rigurosa (usando verdaderas matrices) la descripción anterior.

Para el problema que nos ocupa, y considerando que los cambios en las cantidades de sustancia δn_i , $i = 1, \dots, 5$, se han numerado en correspondencia al orden en el que se

han listado las especies químicas, el conjunto de ecuaciones lineales de balance de la masa elemental (4) toma la forma particular siguiente:

$$\begin{array}{lcl} \text{Cu:} & 1\delta n_1 + 0\delta n_2 + 1\delta n_3 + 0\delta n_4 + 0\delta n_5 & = 0 \\ \text{H:} & 0\delta n_1 + 1\delta n_2 + 0\delta n_3 + 0\delta n_4 + 2\delta n_5 & = 0 \\ \text{N:} & 0\delta n_1 + 1\delta n_2 + 2\delta n_3 + 1\delta n_4 + 0\delta n_5 & = 0 \\ \text{O:} & 0\delta n_1 + 3\delta n_2 + 6\delta n_3 + 1\delta n_4 + 1\delta n_5 & = 0 \end{array} \quad (7)$$

Se ha obtenido un conjunto de cuatro ecuaciones lineales con cinco incógnitas. Nótese que los coeficientes de la incógnita δn_1 en las cuatro ecuaciones lineales corresponden a los subíndices de la fórmula molecular extendida de la especie Cu, véase el listado (6). Algo similar se observa para las restantes incógnitas, considerando, en cada caso, cada una de las restantes especies químicas del sistema. Con base en estas observaciones, el conjunto de ecuaciones de cambio (7) se puede expresar la forma siguiente:

$$(1,0,0,0)\delta n_1 + (0,1,1,3)\delta n_2 + (1,0,2,6)\delta n_3 + (0,0,1,1)\delta n_4 + (0,2,0,1)\delta n_5 = 0. \quad (8)$$

Se insiste que la expresión anterior sólo tiene un carácter ilustrativo y descriptivo. Formalmente, según se ha procedido hasta este momento, no puede ser considerada como una ecuación matricial.

Se debe resolver ahora el conjunto de ecuaciones lineales (7); su solución permitirá escribir una ecuación química que describe a la reacción. La aplicación del procedimiento Gauss-Jordan implica efectuar las operaciones que se indican a continuación.

La incógnita δn_1 sólo tiene un coeficiente no nulo (de hecho, unitario) en la primera ecuación lineal, por lo que ya no es necesario realizar una etapa de reducción. Se busca ahora que la incógnita δn_2 tenga un coeficiente unitario únicamente en la segunda ecuación lineal y que en las restantes ecuaciones ese coeficiente sea nulo. Resulta que el coeficiente ya es unitario en la segunda ecuación, pero en la tercera y cuarta ecuaciones se tienen coeficientes no nulos; en la primera ecuación el coeficiente ya es nulo. Así, se multiplica la segunda ecuación por sendos múltiplos tal que al sumar cada caso a la tercera y cuarta ecuaciones se obtenga un coeficiente nulo. Se procede ahora a considerar la incógnita δn_3 . Nuevamente, se busca que sea la tercera ecuación lineal la única en la que dicha incógnita tenga un coeficiente no nulo, unitario. Para lograr esto, primero se multiplica la tercera ecuación que resultó de la etapa de reducción anterior por un múltiplo tal que haga que el coeficiente de la incógnita δn_3 sea unitario. Después se multiplica dicha ecuación por un múltiplo tal que, al sumar la ecuación con la primera ecuación, en una etapa, y con la cuarta ecuación, en una segunda etapa, los coeficientes de la incógnita bajo análisis se sean nulos. Finalmente, se procede de una manera muy similar a los dos pasos previos de reducción con la incógnita δn_4 . Todo el procedimiento involucró ocho operaciones sobre las ecuaciones del conjunto (7).

La aplicación del procedimiento de Gauss-Jordan al conjunto (7) produjo el conjunto de ecuaciones lineales reducidas siguiente.

$$\begin{aligned}
1\delta n_1 + 0\delta n_2 + 0\delta n_3 + 0\delta n_4 + \frac{3}{4}\delta n_5 &= 0 \\
0\delta n_1 + 1\delta n_2 + 0\delta n_3 + 0\delta n_4 + 2\delta n_5 &= 0 \\
0\delta n_1 + 0\delta n_2 + 1\delta n_3 + 0\delta n_4 - \frac{3}{4}\delta n_5 &= 0 \\
0\delta n_1 + 0\delta n_2 + 0\delta n_3 + 1\delta n_4 - \frac{1}{2}\delta n_5 &= 0
\end{aligned} \tag{9}$$

Si se asigna el valor arbitrario $\delta n_5 = \xi$, entonces la solución del conjunto de ecuaciones lineales se puede expresar como sigue:

$$(\delta n_1, \delta n_2, \delta n_3, \delta n_4, \delta n_5) = \left(-\frac{3}{4}\xi, -2\xi, \frac{3}{4}\xi, \frac{1}{2}\xi, \xi\right) = \xi \cdot \left(-\frac{3}{4}, -2, \frac{3}{4}, \frac{1}{2}, 1\right). \tag{10}$$

Los últimos cinco números que se obtienen son precisamente los coeficientes de la ecuación química, los llamados coeficientes estequiométricos.

Con todo lo anterior, se puede escribir ahora la ecuación química del sistema químico. Sustituyendo los valores encontrados para las variables δn_i en la ecuación (8) se obtiene:

$$\xi \cdot \left[-\frac{3}{4}(1,0,0,0) - 2(0,1,1,3) + \frac{3}{4}(1,0,2,6) + \frac{1}{2}(0,0,1,1) + 1(0,2,0,1)\right] = 0. \tag{11}$$

Como ya se había indicado, los arreglos numéricos en la ecuación corresponden a los subíndices de las fórmulas moleculares, por lo que la ecuación anterior se puede expresar como sigue:

$$\xi \cdot \left[-\frac{3}{4}\text{Cu} - 2\text{HNO}_3 + \frac{3}{4}\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + \frac{1}{2}\text{NO} + 1\text{H}_2\text{O}\right] = 0. \tag{12}$$

La solución encontrada en el artículo de Endslow ^[15] corresponde al caso $\xi = 1$. Dado que, en lo general se tiene que $\xi > 0$, la solución a la ecuación anterior corresponde a la anulación del término que se encuentra entre los paréntesis rectangulares; esta es precisamente la ecuación química asociada. En el caso bajo análisis, la ecuación química es:

$$-\frac{3}{4}\text{Cu} - 2\text{HNO}_3 + \frac{3}{4}\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + \frac{1}{2}\text{NO} + 1\text{H}_2\text{O} = 0. \tag{13}$$

Así pues, la solución general corresponde a múltiplos estrictamente positivos de la ecuación química anterior, la cual puede ser denominada la solución mínima. En efecto, hay una cantidad ilimitada de soluciones, situación que ha causado, y sigue causando, muchas confusiones en la comunidad química (a manera de ejemplo, se puede consultar el artículo de J. Riley y T. G. Richmond de 1992 ^[16]).

Por convención, se estila usar coeficientes enteros y positivos en las ecuaciones químicas, por lo que la solución mínima anterior es mejor escribirla como sigue:



Esta es la ecuación química estequiométrica que describe las relaciones de masa en el proceso reactivo que involucra a las especies Cu, HNO₃, Cu(NO₃)₂, NO y H₂O. Esta ecuación es consistente con la ecuación (5), la llamada ecuación esqueleto de reacción,

que describe la evidencia experimental respecto a las especies químicas que son consideradas reactivos y productos de la reacción.

5. Conclusiones

Sin duda, el procedimiento de la Estequiometría de las Reacciones Químicas permite construir una ecuación química a partir del conocimiento de las especies químicas involucradas en una reacción química. Es verdad que el procedimiento se puede aplicar de una manera sistemática, incluso de manera computacional; este aspecto del método será analizado con mayor profundidad en un trabajo futuro. También es cierto que el procedimiento no es simple, ya que se tiene que realizar una gran cantidad de operaciones, aunque cada una de ellas involucra operaciones aritméticas sencillas. Ahora bien, cada operación que se realiza no depende de información química adicional a la información inicial sobre las especies químicas y sus fórmulas moleculares.

El caso que se ilustró corresponde a una situación típica en el análisis de los conjuntos de ecuaciones lineales: el número de incógnitas es mayor en una unidad al número de ecuaciones lineales. La teoría indica que estos conjuntos tienen una infinidad de soluciones, tal y como se obtuvo en el ejemplo. Otros casos también importantes de conjuntos de ecuaciones lineales derivados de sistemas químicos reaccionantes serán presentados en trabajos futuros.

Para terminar, debería ser claro que el procedimiento de la Estequiometría de las Reacciones Químicas se puede expresar totalmente en términos de matrices y vectores. De hecho, esta es la forma en la que se presenta el procedimiento en los artículos de R. W. Missen y W. R. Smith. Nosotros consideramos que una ilustración del procedimiento directamente en términos de las ecuaciones lineales puede facilitar su comprensión y motivar su uso. Es cierto que el procedimiento no puede ser enseñado en los cursos preuniversitarios, e incluso en los primeros cursos universitarios, ya que los requerimientos matemáticos son elevados; esto, sin embargo, no debe ser una razón para que se le ignore por completo. Creemos que el procedimiento debería ser introducido en cursos intermedios y/o avanzados. Queda un hecho: la construcción de ecuaciones químicas (el famoso problema de “balanceo”) es un problema matemático no trivial.

6. Bibliografía

1. Szabadváry, F., The birth of stoichiometry, J. Chem. Educ., 39, 267-270 (1962).
2. Bennett, G. W., Material balances and redox equations, J. Chem. Educ., 31, 324-325 (1954).
3. Aris, R., Elementary Chemical Reactor Analysis. Butterworths Publishers, Boston, 1989.
4. Kolb, D., The chemical equation. Part I: Simple reactions, J. Chem. Educ., 55, 184-189 (1978).
5. Cohen, E. R., et al., “Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry”, IUAPC Green Book, 3rd edition, 2nd printing. IUPAC & RSC Publishing, Cambridge, 2008.
6. Bottomley, J., Note on a method for determining the coefficients in chemical equations, Chem. News, 37, 110-111 (1878).
7. Véase la referencia 2.
8. Haas, R. and Gayer, K. H., Balancing ionic equations by the method of undetermined coefficients, J. Chem. Educ. 39, 537-538 (1962).
9. Smith, W. R. and Missen, R. W., What is chemical stoichiometry? Chemical Engineering Education, 13, 26-32 (1979).

10. Missen, R. W. and Smith, W. R., Chemical Reaction Stoichiometry (CRS): A tutorial. Downloaded from <http://www.chemical-stoichiometry.net>, 1998.
11. Véase la referencia 10.
12. Véase la referencia 5.
13. Noble, B. and Daniel, J. W., Applied Linear Algebra, second edition. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1977.
14. Endslow, A. W. S., Balancing chemical equations, J. Chem. Educ. 8, 2453 (1931).
15. Véase la referencia 14.
16. Riley, J. and Richmond, T. G., Redox equations with an infinite number of balanced solutions, J. Chem. Educ., 69, 114-115 (1992).

Depolimerización química de tereftalato de polietileno de desecho mediante hidrolisis neutra, para la obtención de ácido tereftálico y su posterior esterificación a DOTP

Pacheco-Juárez, J. P.¹, Chávez-Malagón, A.¹, Robledo Pérez, J. M. ², Cruz-Gómez M. J. ¹

¹ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química,
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria,
04510 Ciudad de México, México.

² OMM Grupo Químico, S. A. de C. V.

E-mails: jq.pablo.pacheco.15@gmail.com, anayaksim28@gmail.com,
juanmanuel.robledo@lotufe.com y mjcg@unam.mx

1. Resumen

El tereftalato de polietileno (PET) es una de las resinas termoplásticas más utilizadas globalmente y su impacto ambiental es significativo debido a su dificultad para degradarse y los retos asociados con el reciclaje. Este estudio investiga la depolimerización química del PET botella mediante hidrólisis neutra para obtener ácido tereftálico (TPA) y su posterior transformación a tereftalato de dioctilo (DOTP). Se evaluaron diferentes temperaturas (240-270 °C) y tiempos de reacción (30-120 minutos) para optimizar el rendimiento de TPA, alcanzando hasta un $90.8 \pm 0.4\%$ para PET incoloro en condiciones óptimas. La síntesis de DOTP se realizó mediante esterificación de TPA proveniente de PET botella con 2-etilhexanol (2-EH) a 190-200 °C, mostrando una conversión efectiva de TPA a DOTP. Los resultados demuestran que, mientras el

reciclaje mecánico de PET tiene limitaciones, los métodos de reciclaje químico ofrecen alternativas efectivas para valorizar el PET, produciendo TPA y DOTP de alta pureza, contribuyendo a una economía circular más sostenible.

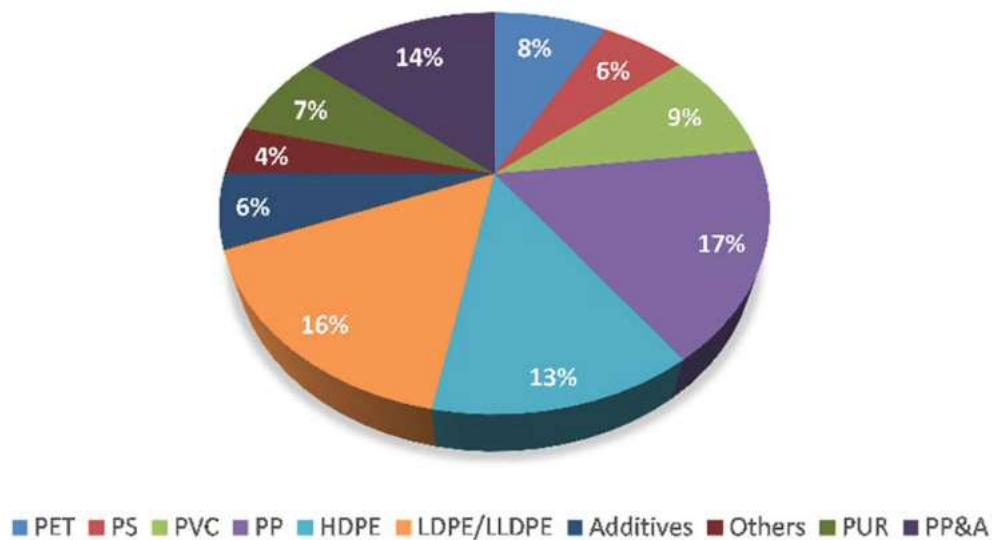
2. Introducción.

El tereftalato de polietileno, conocido como PET, es una de las resinas termoplásticas semicristalinas más utilizadas y ampliamente disponibles en el mundo. Este material destaca por ser el único polímero saturado de importancia comercial que se emplea tanto en la fabricación de fibras como de películas plásticas [1].

El PET es muy popular en aplicaciones comerciales, especialmente en la fabricación de fibras para ropa y contenedores para líquidos y alimentos. Este material presenta excelentes propiedades mecánicas, como alta resistencia a la tracción y al desgarró, además de capacidad de sellado térmico. También actúa como una barrera eficaz contra gases como el oxígeno y el dióxido de carbono, así como contra compuestos aromáticos y anhídros [2].

La síntesis de PET se realiza principalmente a partir de ácido tereftálico (TPA) y etilenglicol (EG). En este proceso, se pueden incorporar diversos ácidos dicarboxílicos y dioles alifáticos o aromáticos para modificar las características del polímero. El proceso de síntesis incluye cuatro etapas clave: (1) esterificación, (2) prepolimerización, (3) polimerización y (4) policondensación en estado sólido. La formación de cadenas de PET se lleva a cabo mediante dos reacciones principales: la esterificación de grupos carboxilo con grupos hidroxilo terminales y la transesterificación de ésteres de glicol terminados en hidroxilo. Las reacciones inversas de estos procesos son la hidrólisis y la glicólisis, respectivamente [7][8].

Como resina termoplástica semicristalina, el PET se utiliza para la fabricación de fibras químicas y películas. Desde la década de 1940, las fibras de PET han sido la base de la producción de textiles tradicionales, y no fue hasta la década de 1980 que el PET se comenzó a utilizar ampliamente en la producción de botellas plásticas, alcanzando una producción de más de 3 mil millones de botellas en 1987. Con el avance de la ciencia y la tecnología, se han ampliado las aplicaciones del PET a campos como fibras de alta resistencia, películas, recubrimientos, componentes automotrices y dispositivos electrónicos, aumentando su demanda considerablemente en los últimos años. La Figura 1 muestra la proporción de la producción global de PET en comparación con otros plásticos en años recientes [3].



Hay que dar la definición de los diferentes polímeros que se mencionan con su acrónimo

Figura 1. La porción de PET dentro de la producción de plásticos.

Fuente: Fan Cao, a Liyan Wang, Rongrong Zheng, Liying Guo RSC Adv., 2022, 12, 31564

El PET es difícil de degradar en condiciones naturales, lo que ha generado preocupaciones a nivel mundial debido a la contaminación ambiental que provoca. Aunque los plásticos generalmente tienen una baja tasa de reciclaje, el PET destaca por tener una de las tasas de reciclaje más altas. En 2017, casi el 57% de las botellas de PET en Europa fueron recicladas [4]. En México, el consumo nacional aparente de envases de PET es de aproximadamente 860,000 toneladas al año, de las cuales 177,000 toneladas son de resina reciclada post-consumo (PCR) y 683,000 toneladas son de resina virgen. De esta cantidad, se recuperaron 540,000 toneladas, lo que representa alrededor del 63% [5] (figura 2).



Figura 2. Consumo aparente de envases de PET en México.

Fuente: ECOCE - Cifras y Estadísticas." ECOCE, https://www.ecoce.mx/cifras_y_estadisticas.

La recuperación de energía del PET mediante incineración o pirólisis no es viable debido a sus efectos negativos en el medio ambiente y la salud humana, además de que no se obtienen materias primas secundarias de alto valor. El reciclaje primario requiere materias primas de alta pureza, mientras que el reciclaje mecánico es menos eficiente debido a las reacciones secundarias que degradan las propiedades físicas de los productos reciclados, cambiando su color y reduciendo su valor. El reciclaje es una necesidad para una economía circular y una medida esencial para la conservación de energía y la reducción de emisiones, contribuyendo a la realización de los objetivos de “pico de carbono” y “neutralidad de carbono” [6].

El PET se puede reciclar o recuperar mediante cuatro métodos: reciclaje primario (reciclaje in situ de desechos puros), reciclaje secundario (reciclaje mecánico), reciclaje terciario (reciclaje químico) y reciclaje cuaternario (incineración) [12-14]. La solvólisis, aplicada para la despolimerización de polímeros de condensación como el PET, es una tecnología de reciclaje químico [12,15]. Según el solvente utilizado, los métodos de

solvólisis se clasifican en glicólisis [16,17], hidrólisis [18,19], amonólisis, aminólisis [20,21] y metanólisis [22,23]. La glicólisis es el proceso de despolimerización más desarrollado y usado industrialmente, empleando un glicol, como el etilenglicol, como agente degradante. Empresas como DuPont, Goodyear, Eastman, Kodak, Shell Polyester y Zimmer AG utilizan la glicólisis para el reciclaje post-consumo de PET [24]. En cuanto a la metanólisis, pocas tecnologías han avanzado más allá del laboratorio [25]. Por ejemplo, Loop Industries ya opera a escala de planta piloto [26]. Respecto a la aminólisis y amonólisis, hay demostraciones de despolimerización a escala de laboratorio, pero no hay evidencia de implementación a mayor escala [27]. Otras tecnologías novedosas de reciclaje químico, como las enzimas que hidrolizan PET, están en etapas tempranas de desarrollo [28].

La hidrólisis es un método alternativo de despolimerización que puede operar bajo condiciones moderadas y con residuos post-consumo altamente contaminados [29]. La hidrólisis del PET se clasifica como neutra [30], ácida [16] y alcalina [3,31]. En la hidrólisis neutra, se utiliza agua o vapor con un catalizador de transesterificación, como acetato de metal alcalino. Este proceso produce ácido tereftálico (TPA) de baja pureza, ya que las impurezas no se separan fácilmente [32]. La hidrólisis ácida usa grandes cantidades de ácidos (>87% en peso), como H_2SO_4 , HNO_3 o H_3PO_4 [20], generando desechos inorgánicos y acuosos y alta corrosividad [33]. Las condiciones de temperatura y presión más bajas resultan en tasas de hidrólisis más lentas, y la carbonización del etilenglicol afecta su pureza [30,34]. Por lo tanto, la opción alcalina es la alternativa más desarrollada y deseable, donde las partículas de PET se hidrolizan con una solución acuosa de NaOH o KOH (4-20% en peso) bajo presión atmosférica y temperaturas de 80-300 °C durante varias horas [31]. El PET reacciona para producir la sal disódica ($\text{Na}_2\text{-TPA}$) y EG. Luego, se puede aislar TPA puro neutralizando la mezcla con un ácido inorgánico fuerte, generalmente hasta pH= 2-3. Los rendimientos y la pureza del TPA obtenido son generalmente altos. Varios estudios [35-40] han demostrado que algunas sales cuaternarias, como yoduro de tetrabutilamonio o bromuro de trioctilmetilamonio, pueden acelerar significativamente la tasa de reacción en condiciones alcalinas, reduciendo así la temperatura de operación.

Entre los diferentes productos de PET, las botellas de PET son de los materiales más reciclados, con una tasa de recolección promedio del 60% y una tasa de reciclaje del 50% en Europa; sin embargo, solo el 31% del PET reciclado de botellas se utiliza para producir pellets de botellas [46]. El resto del PET reciclado se destina a productos de menor valor, principalmente bandejas de PET en un 31%, que a menudo no se reciclan ni reutilizan [41]. La falta de tecnologías adecuadas de clasificación y reciclaje, así como el diseño de las bandejas, hace que este residuo de PET sea difícil de reciclar. La variabilidad en color y composición multicapa, junto con la contaminación de la recolección selectiva o residual, hace que su reciclaje mecánico sea generalmente ineficaz [42,43,47]. Además, dada la baja viscosidad intrínseca de las bandejas de PET (cadenas de polímero más cortas), el reciclaje mecánico de bandejas en botellas no es viable, ya que estas últimas requieren una alta viscosidad [41]. Por lo tanto, se está explorando la despolimerización química para valorizar las bandejas de PET, eliminando

impurezas y produciendo nuevamente el monómero de PET [25], siguiendo los principios del desarrollo sostenible en aplicaciones de ciclo cerrado [29,31,44].

Parte del presente estudio se enfoca en obtener ácido tereftálico (TPA) mediante hidrólisis neutra, investigando las mejores condiciones de reacción en función de la temperatura y el tiempo de residencia, utilizando PET de desecho como materia prima.

Los plastificantes más comúnmente utilizados son monoméricos, como los ftalatos, adipatos y benzoatos. Sus desventajas incluyen menor resistencia al calor y posible migración. Debido a la toxicidad y tendencia a exudar de los plastificantes ftálicos, su uso ha disminuido, y se han buscado materiales más seguros como alternativas. Aunque los plastificantes oligoméricos tienen menor capacidad plastificante, presentan volatilidad y migración limitadas y no se extraen, lo cual es esencial en muchas aplicaciones [9].

Aunque hay muchas publicaciones sobre la obtención del tereftalato de dioctilo (DOTP) mediante alcoholólisis de PET, son pocos los estudios que describen la síntesis de plastificantes oligoméricos basados en productos de despolimerización de residuos de PET. Por ejemplo, Dupont et al. [10] informaron sobre la alcoholólisis de residuos de PET utilizando 2-etil-1-hexanol (EH) a temperatura de reflujo para sintetizar plastificantes DOTP para PVC flexible. El DOTP producido fue equivalente a los grados comerciales en términos de eficiencia de plastificación para PVC.

El punto de ebullición del EH a presión atmosférica es aproximadamente 180°C, lo que hace que la eficiencia de la alcoholólisis sea baja. Se conocen tres métodos para mejorar la eficiencia de la alcoholólisis: uso de EH en condiciones sub- y supercríticas, uso de catalizadores de transesterificación y/o la adición de cosolventes [11].

El objetivo de este trabajo es reemplazar completamente los plastificantes tóxicos de bajo peso molecular basados en ftalatos utilizados en la plastificación del PVC, con materiales ambientalmente amigables.

3. Parte experimental.

3.1. Químicos

Se utilizaron estándares y solventes de grado analítico sin purificación adicional. Los estándares comerciales de acetato de cinc y el (Dar el nombre del producto antes de la fórmula condensada) $[C_8H_{18}OSn]$ fueron adquiridos de Sigma-Aldrich y Merck. El nitrógeno (N_2) (99.5%) como gas inerte y el dióxido de carbono (99.995%) como estándar fueron suministrados por INFRA. El acetonitrilo (ACN) (99.9%), el metanol (99.9%) utilizados para análisis por HPLC fueron obtenidos de Fisher Scientific, J.T. Baker y Sigma-Aldrich.

3.2 Preparación de la muestra.

El PET botella reciclado sin color y coloreado (neutro y verde) de un diametro promedio de 3mm y el 2-Etil-hexanol fueron obtenidos de OMM Chemical Group (México). El PET fue lavado con aguda desionizada a 60 °C y secado antes de su depolimerización.

3.3. Depolimerización de PET por hidrolisis neutra.

La degradación de PET reciclado se llevó a cabo en un reactor de alta temperatura y presión (series 4848 de acero inoxidable de 2 L de capacidad, Parr Instruments Co.) diseñado para una presión máxima de 1900 psi y una temperatura máxima de 500 °C. El sistema de alta presión y temperatura está equipado con un bloque de medidores que incluye un termopar, un disco de ruptura y una válvula para la entrada o salida de gas. Se utilizó un collar de calentamiento de alta potencia, controlado por un regulador de temperatura, para calentar rápidamente el reactor a la temperatura deseada. Durante la depolimerización del residuo de PET, se empleó un agitador electromagnético (a 1000 rpm) para mezclar la mezcla de reacción.

Las reacciones de depolimerización química del PET se realizaron variando dos parámetros principales que influyen significativamente en la depolimerización mediante hidrolisis (figura 3): Temperaturas que oscilaban entre 240 y 270 °C, y periodos de reacción que iban de 30 a 120 minutos. La mezcla de residuos de PET y agua, en una proporción de peso de 1/3, se cargó en el reactor a temperatura ambiente. Antes del calentamiento, el reactor se llenó a presión atmosférica y temperatura ambiente. Posteriormente, se calentó el reactor hasta la temperatura deseada y se mantuvo constante durante el tiempo de reacción seleccionado (30, 60, 90 y 120 minutos).

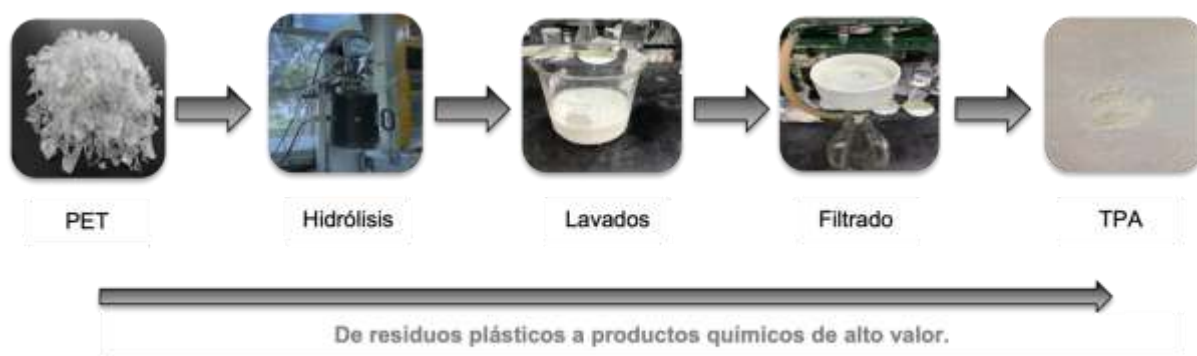


Figura 3. Diagrama propuesto para la producción de TPA.

Tras completar el periodo de reacción (30, 60, 90 y 120 minutos), el enfriamiento del reactor fue muy rápido. Tomó aproximadamente 1 ± 0.5 minutos retirar el calentador, y luego el reactor se enfrió inmediatamente en un baño de agua para volver a temperatura ambiente.

El reactor se abrió y los productos de reacción sólidos y líquidos se transfirieron a un matraz. Se enjuagó el reactor con una pequeña cantidad de agua para evitar la pérdida de productos de depolimerización. La mezcla post-reacción (líquida y sólida) se filtró para separar los residuos de PET no reaccionados y las impurezas precipitadas. Posteriormente, el PET no degradado recolectado en el papel de filtro se lavó con agua destilada, se secó y se pesó. Se inició lavando el TPA con 3 L de agua a temperaturas de entre 50 y 65 °C, manteniendo una agitación constante. Posteriormente, se realizó una filtración al vacío para separar el TPA de los etilenglicoles. Este proceso de lavado se repitió tres veces. Luego, el producto se secó en una estufa a 100 °C (figura 4). Se pesó y se calculó el rendimiento de TPA sólido con estas fórmulas:

$$150 \text{ g PET} \left(\frac{1 \text{ mol PET}}{192.17 \text{ g PET}} \right) \left(\frac{1 \text{ mol TPA}}{1 \text{ mol PET}} \right) \left(\frac{166.13 \text{ g TPA}}{1 \text{ mol TPA}} \right) = 129.674 \text{ g TPA}$$

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{TPA Experimental}}{\text{TPA teórico}}$$

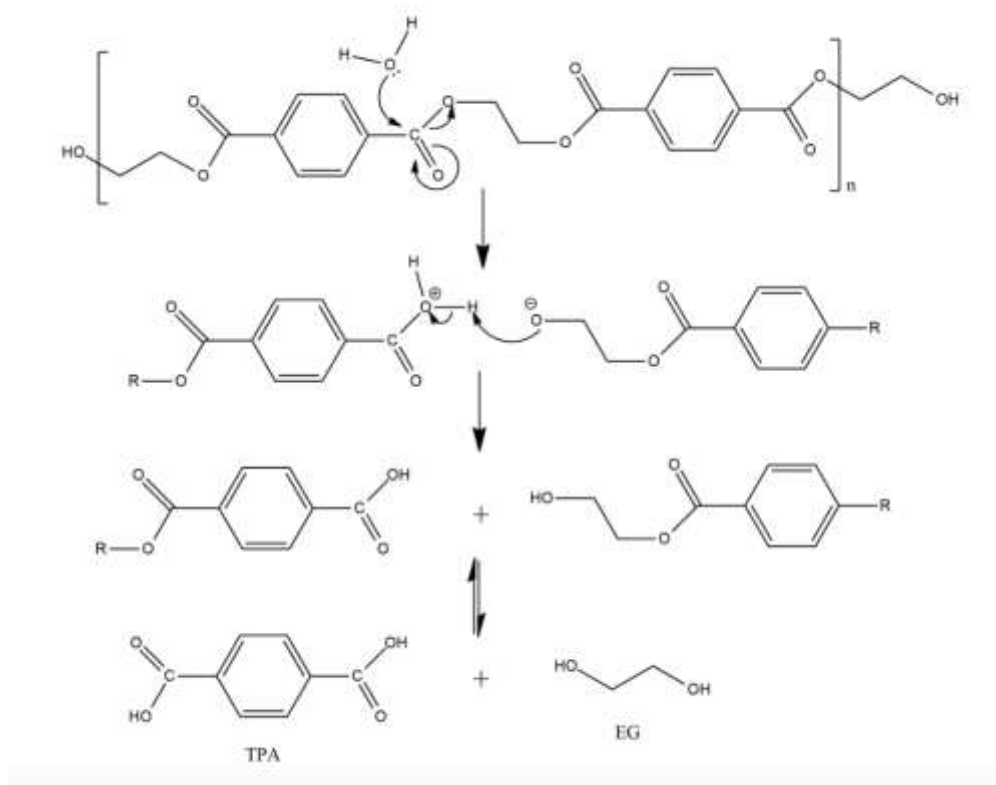


Figura 4. Esquema general de la reacción de hidrólisis neutra de PET [48]

3.4. Síntesis tereftalato de dioctilo, DOTP.

El diagrama esquemático del equipo de reacción para la síntesis de tereftalato de dioctilo (DOTP) se muestra en la (figura 5). La reacción de esterificación de TPA (figura 6) se realizó a presión atmosférica utilizando un matraz de fondo redondo de tres bocas de 400 mL, equipado con un termómetro y un condensador de reflujo. A temperaturas de reflujo de 190 a 200 °C, el solvente y reactivo 2-EH y el producto (agua) se refluyen. Las densidades de 2-EH y agua son 0.84 y 1.0, respectivamente, y debido a la inmiscibilidad de los dos compuestos, la mezcla se separa en dos fases, con el agua más pesado en el fondo. Así, el producto de reflujo de agua en el condensador de la figura 5 se separa hacia el fondo del recipiente de reflujo y puede ser descargado a la reacción. Luego, el reactivo 2-EH se vuelve a reflujo al sistema de reacción, provocando la alcoholólisis del PET para producir DOTP (figura 6).

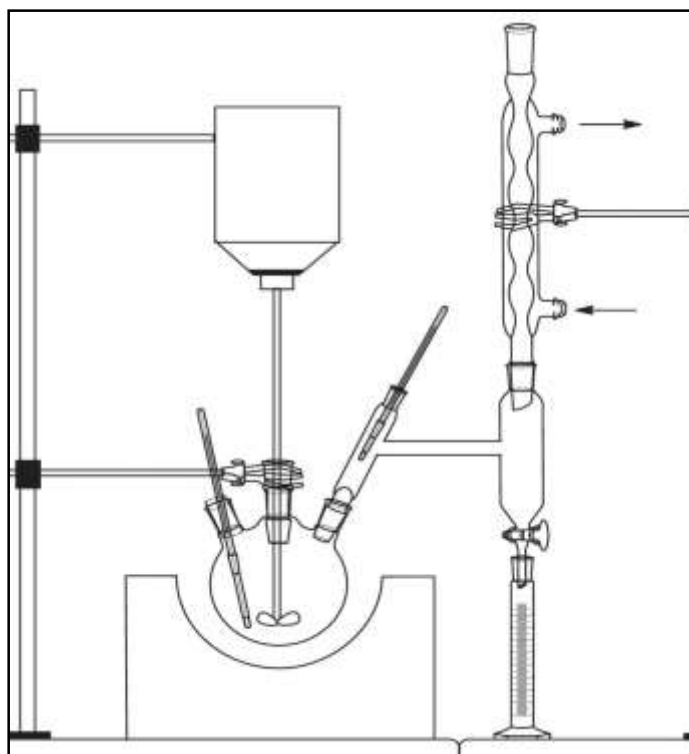


Figura 5. Esquema propuesto para la producción de DOTP.

Fuente: Chen, 2014.

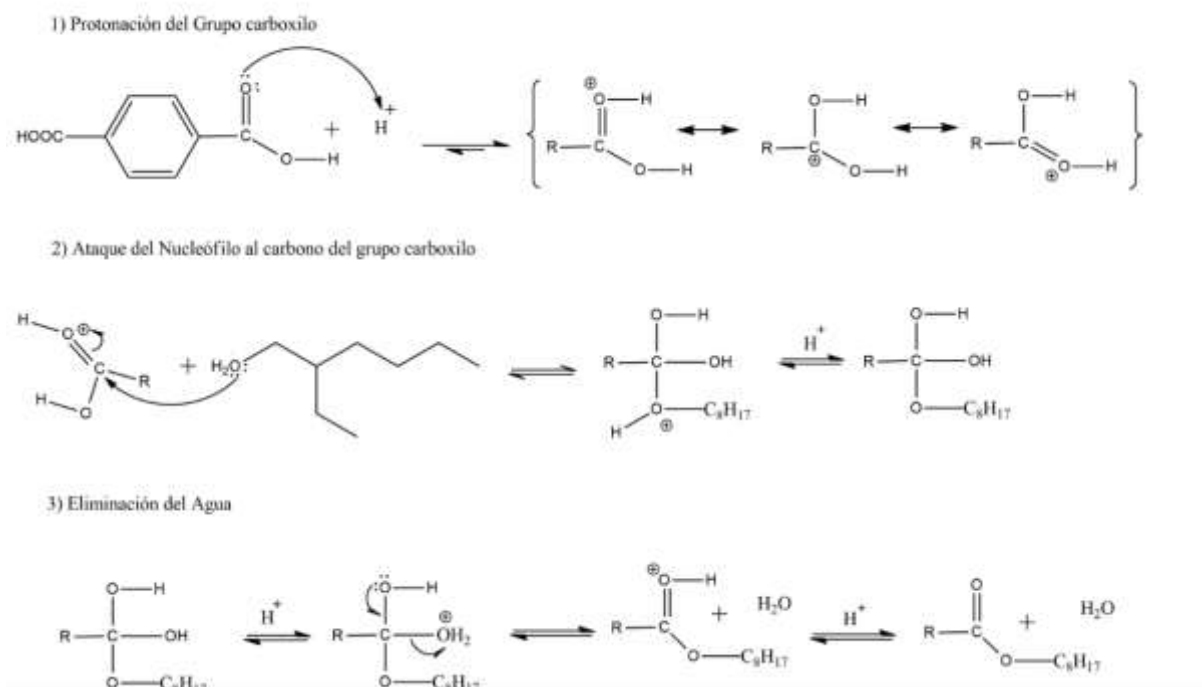


Figura 6. Esquema general de reacción de la esterificación de TPA para obtener DOTP. [48]

3.5. Método cromatografía de gases.

Para la caracterización de productos se realizaron análisis de Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC/MS).

4. Resultados y discusión.

4.1. Influencia de la Temperatura y el Período de Reacción en el Rendimiento de TPA

En cada experimento, el reactor se llenó a temperatura ambiente, estableciendo la presión inicial como la presión atmosférica. A medida que se calentaba el reactor, la presión aumentaba. Después de la degradación vía hidrolisis de los residuos de PET, la mezcla de agua post-reacción contenía cristales de TPA crudos. Estos cristales eran de color amarillo claro cuando se obtenían a temperaturas menores de 250 °C y marrón claro bajo condiciones de temperaturas mayores a 250°C. Cuando se degradaron residuos de PET, aparecieron partículas negras sólidas en la mezcla post-reacción, atribuibles a los aditivos y tintes en los plásticos de residuos de PET. Los efectos de la temperatura y el período de reacción en el rendimiento de TPA se muestran en la Figura 7 y 8.

Para la degradación vía hidrólisis de botellas de PET incoloras en condiciones de 240°C durante 30 minutos, parte del PET permaneció no degradado, resultando en el rendimiento más bajo de TPA bajo estas condiciones. A medida que aumentaba el período de reacción y la temperatura, las impurezas (partículas negras sólidas) aparecían en la fase líquida. Estas impurezas probablemente son aditivos, como compuestos de cromo (colorantes) y dietilfosfinato de aluminio (retardante de flama), que se descomponían durante la reacción. Prolongar el período de reacción y aumentar la temperatura mejoró el rendimiento de TPA hasta 270 °C y 120 minutos, logrando el rendimiento más alto. El rendimiento más alto de TPA a partir de residuos de PET incoloro fue de $90.8 \pm 0.4\%$ (Tabla.1)

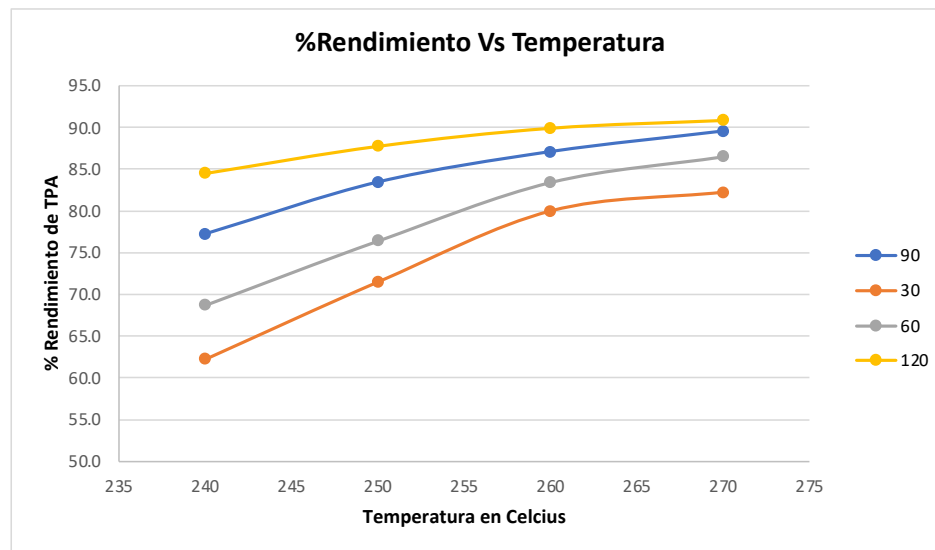


Figura 7. Efectos de la temperatura en el rendimiento de TPA.

temperatura de mayor a menor

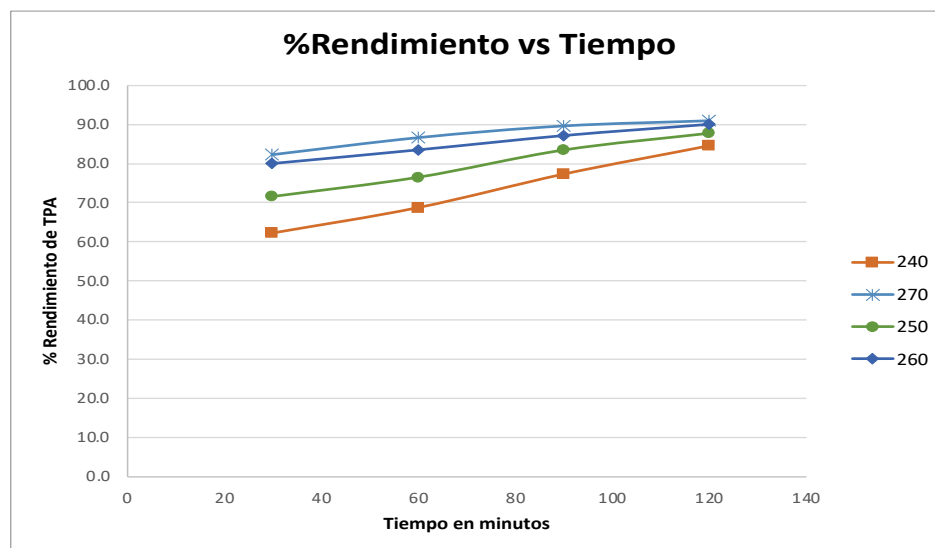


Figura 7. Efectos del período de reacción en el rendimiento de TPA.

Temperatura (Celcius)	Tiempo (minutos)	Rendimiento TPA (%)
240	30	62.23
	60	68.71
	90	77.27
	120	84.52
250	30	71.49
	60	76.42
	90	83.44
	120	87.76
260	30	80.0
	60	83.4
	90	87.1
	120	89.9
270	30	82.2
	60	86.5
	90	89.5
	120	90.8

Tabla 1. Rendimiento de TPA a partir de residuos de PET incoloro.

4.2. Condiciones de reacción para la esterificación de TPA.

Condiciones Iniciales: La reacción se realizó con 30 g de ácido tereftálico (TPA) y 60 g de 2-etilhexanol (2-EH) en un reactor de vidrio de tres bocas. La adición de los reactivos formó dos fases iniciales, y la cantidad total de reactivos no superó la mitad del volumen del reactor.

La temperatura se elevó a 180°C en un intervalo de 30 minutos, lo que permitió el inicio de la esterificación. Se observó una transición de dos fases a una sola fase al finalizar la reacción.

Etapas de la Reacción:

Primera Etapa: Se detectó abundante vapor de 2-EH y formación de espuma significativa.

Segunda Etapa: Reducción en el vapor de alcohol y formación de espuma por la continua generación de agua.

Tercera Etapa: El sistema se estabilizó con bajo nivel de espuma y constante reflujo de alcohol.

La transición de dos fases a una sola indica una conversión efectiva del TPA en el producto deseado, DOTP. La primera etapa mostró una alta generación de vapor y espuma, mientras que la segunda etapa reveló la necesidad de un manejo cuidadoso del sistema para evitar la inestabilidad. En la tercera etapa, el sistema se estabilizó, permitiendo un control más eficiente del proceso.

El aumento en la temperatura máxima refleja la formación continua de DOTP y el consumo de TPA. La gestión adecuada de la agitación y la proporción de reactivos fue crucial para mantener la estabilidad del sistema y evitar problemas como la formación excesiva de espuma y la inundación del reactor.

4.3. Caracterización de los productos obtenidos.

A continuación, en las figuras 8 y 9, se presentan el cromatograma y el DOTP derivados de los productos de la depolimerización del PET reciclado.

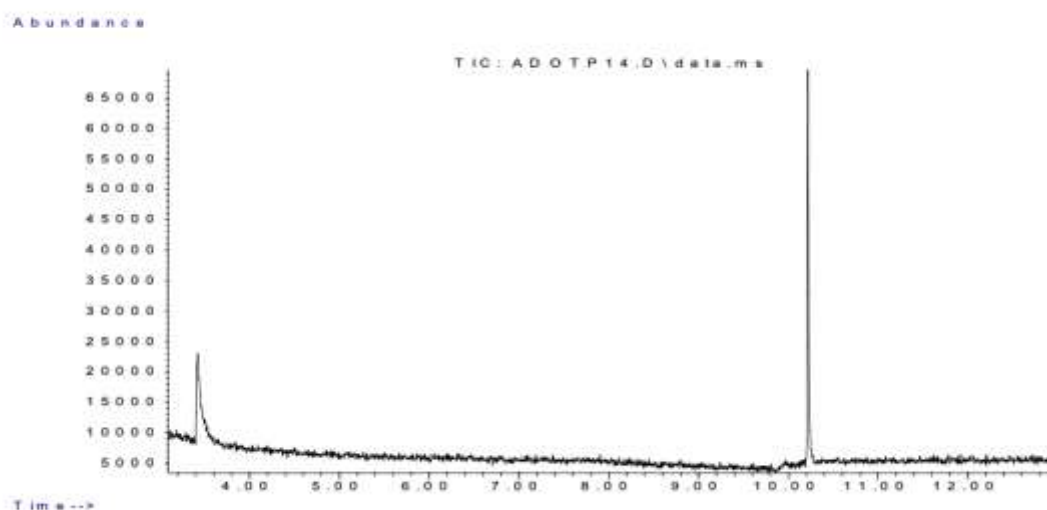


Figura 8. Cromatograma del DOTP sintetizado a partir de TPA obtenido de la hidrólisis neutra de PET reciclado.

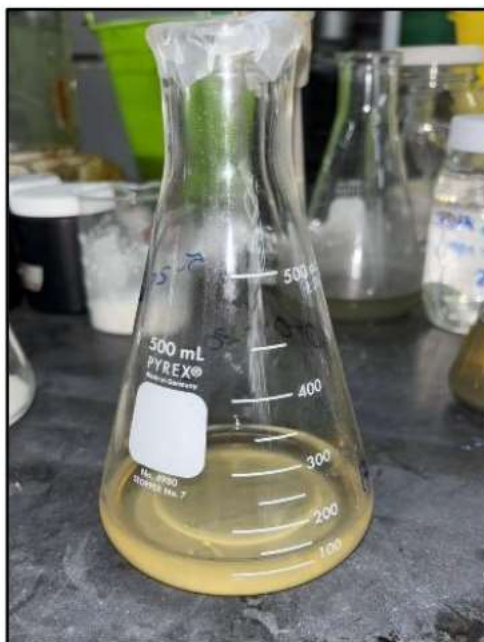


Figura 9. DOTP sintetizado a partir de TPA obtenido de la hidrólisis neutra de PET reciclado.

5. Conclusiones

La investigación sobre la depolimerización química del PET y la síntesis de DOTP reveló varios hallazgos importantes sobre los parámetros de reacción y su influencia en los rendimientos y la calidad de los productos obtenidos.

5.1. Depolimerización Química del PET:

Influencia de la temperatura y el período de reacción: Los experimentos demostraron que la temperatura y el tiempo de reacción tienen un impacto significativo en el rendimiento del TPA obtenido. En condiciones de (240–270 °C), el rendimiento de TPA aumentó con la temperatura y el tiempo, alcanzando un máximo del $90.8 \pm 0.4\%$ con PET incoloro a 270 °C durante 120 minutos. Las impurezas, como partículas negras, se atribuyen a aditivos y colorantes presentes en el PET, que se descomponen durante el proceso de reacción.

La hidrolisis del PET mostró que el rendimiento óptimo de TPA se obtiene cuando se controlan cuidadosamente la temperatura y el tiempo de reacción.

La esterificación del TPA con 2-EH se realizó con éxito en un reactor de vidrio a temperaturas de reflujo entre 190 y 200 °C. La transición de dos fases a una sola fase indica una conversión efectiva del TPA en DOTP. Durante la reacción, se observó una

alta generación de vapor y espuma, que se redujo a medida que la reacción progresaba. La temperatura máxima alcanzada durante la reacción, 225 °C, reflejó la formación continua de DOTP y el consumo de TPA.

La gestión adecuada del sistema de agitación, y la proporción de reactivos fue crucial para mantener la estabilidad del proceso. Un manejo eficiente evitó problemas como la formación excesiva de espuma y la inundación del reactor, lo cual es esencial para garantizar una reacción uniforme y un alto rendimiento del producto final.

En resumen, la optimización de las condiciones de depolimerización y esterificación ha demostrado ser esencial para mejorar los rendimientos de TPA y DOTP. Estos resultados subrayan la viabilidad de estos métodos para el reciclaje químico y la síntesis eficiente de productos a partir de residuos de PET.

6. Bibliografía

[1] B. Golding, *Polymers and Resins: Their Chemistry and Chemical Engineering*, Van Nostrand, New York, 1959.

[2] V. Siracusa, P. Rocculi, S. Romani, M. Dalla Rosa, Biodegradable polymers for food packaging: a review, *Trends Food Sci. Technol.* 19 (12) (2008) 634-643.

[3] F. Cao, L. Wang, et al., Research and progress of chemical depolymerization of waste PET and high-value application of its depolymerization products, *RSC Advances*, 12, 49, 11 (2022).

[4] A. B. Raheem, Z. Z. Noor, A. Hassan, M. K. Abd Hamid, S. A. Samsudin, A. H. Sabeen, Chemical recycling of PET: Current status and future directions, *J. Cleaner Prod.*, 225 (2019) 1052–1064.

[5] ECOCE, Cifras y Estadísticas. https://www.ecoce.mx/cifras_y_estadisticas.

[6] F. Zhang, F. Wang, X. Wei, Y. Yang, S. Xu, D. Deng, Y.-Z. Wang, Energy recovery of waste PET by incineration or pyrolysis is not feasible, *J. Energy Chem.*, 69 (2022) 369–388.

[7] F. A. Al-Sabagh, F. Z. Yehia, G. Eshaq, A. ElMetwally, A. M. Rabie, Recycling of PET, *Eur. Polym. J.*, 41 (7) (2005) 1453-1467.

[8] A. Jain, R. K. Soni, Spectroscopic investigation of end products obtained by aminolysis of poly (ethylene terephthalate) waste in the presence of zinc acetate as a catalyst, *J. Polym. Res.*, 14 (2007) 475-481.

[9] S. H. Mansour, N. E. Ikladious, Depolymerization of poly(ethylene terephthalate) wastes using 1,4-butanediol and triethylene glycol, *Polym. Test*, 21 (2002) 497.

[10] L. A. Dupont, V. P. Gupta, Degradative transesterification of terephthalate polyesters to obtain DOTP plasticizer for flexible PVC, *J. Vinyl Technol.*, 15 (1993) 100.

[11] J. Chen, J. Lv, Y. Ji, J. Ding, X. Yang, M. Zou, et al., Alcoholysis of PET to produce dioctyl terephthalate by isooctyl alcohol with ionic liquid as cosolvent, *Polym. Degrad Stab*, 107 (2014) 178-183.

[12] V. Sinha, M.R. Patel, J.V. Patel, Pet waste management by chemical recycling: A review, *J. Polym. Environ.* 18 (2010) 8–25, <https://doi.org/10.1007/s10924-008-0106-7>.

[13] M.N. Siddiqui, D.S. Achilias, H.H. Redhwi, D.N. Bikiaris, K.A.G. Katsogiannis, G. P. Karayannidis, Hydrolytic depolymerization of PET in a microwave reactor, *Macromol. Mater. Eng.* 295 (2010) 575–584, <https://doi.org/10.1002/mame.201000050>.

[14] N.A.S. Suhaimi, F. Muhamad, N.A. Abd Razak, E. Zeimaran, Recycling of polyethylene terephthalate wastes: A review of technologies, routes, and applications, *Polym. Eng. Sci.* 62 (2022) 2355–2375, <https://doi.org/10.1002/pen.26017>.

[15] J. Huang, A. Veksha, W.P. Chan, A. Giannis, G. Lisak, Chemical recycling of plastic waste for sustainable material management: A prospective review on catalysts and processes, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 154 (2022), 111866, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111866>.

[16] J. Xin, Q. Zhang, J. Huang, R. Huang, Q.Z. Jaffery, D. Yan, Q. Zhou, J. Xu, X. Lu, Progress in the catalytic glycolysis of polyethylene terephthalate, *J. Environ. Manag.* 296 (2021), 113267, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113267>.

[17] A. Aguado, L. Martínez, L. Becerra, M. Arieta-araunabena, ~ S. Arnaiz, A. Asueta, I. Robertson, Chemical depolymerisation of PET complex waste: hydrolysis vs. glycolysis, *J. Mater. Cycles Waste Manag* 16 (2014) 201–210, <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0177-y>.

[18] S. Ügdüler, K.M. Van Geem, R. Denolf, M. Roosen, N. Mys, K. Ragaert, S. De Meester, Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis, *Green Chem.* 22 (2020) 5376–5394, <https://doi.org/10.1039/d0gc00894j>.

[19] W. Yang, R. Liu, C. Li, Y. Song, C. Hu, Hydrolysis of waste polyethylene terephthalate catalyzed by easily recyclable terephthalic acid, *Waste Manag* 135 (2021) 267–274, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.009>.

[20] K. Chan, A. Zinchenko, Conversion of waste bottles' PET to a hydrogel adsorbent via PET aminolysis, *J. Environ. Chem. Eng.* 9 (2021), 106129, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106129>.

[21] K. Chan, A. Zinchenko, Conversion of waste bottle PET to magnetic microparticles adsorbent for dye-simulated wastewater treatment, *J. Environ. Chem. Eng.* 10 (2022), 108055, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108055>.

[22] S. Tang, F. Li, J. Liu, B. Guo, Z. Tian, J. Lv, MgO/NaY as modified mesoporous catalyst for methanolysis of polyethylene terephthalate wastes, *J. Environ. Chem. Eng.* 10 (2022), 107927, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107927>.

[23] J. Payne, M.D. Jones, The chemical recycling of polyesters for a circular plastics economy: challenges and emerging opportunities, *ChemSusChem* 14 (2021) 4041–4070, <https://doi.org/10.1002/cssc.202100400>.

[24] S. Hann, T. Connock, Chemical Recycling: State of Play Report for CHEM Trust, (2020). <<https://www.eunomia.co.uk/reports-tools/final-report-chemical-recycling-state-of-play/>> , (accessed 26 February 2022).

[25] M. Han, Depolymerization of PET Bottle via Methanolysis and Hydrolysis, *Plast. Des. Lib.* (2019) 85–108, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811361-5.00005-5>.

[26] Infinite Loop. <https://www.loopindustries.com/cms/wp-content/uploads/2021/08/Loop-Industries-Investor-Presentation_Final.pdf> , (accessed 21 March 2022).

[27] B. Geyer, G. Lorenz, A. Kandelbauer, Recycling of poly(ethylene terephthalate) – A review focusing on chemical methods, *Express Polym. Lett.* 10 (2016) 559–586, <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2016.53>.

[28] F. Kawai, The current state of research on PET hydrolyzing enzymes available for biorecycling, *Catalysts* 11 (2021) 206, <https://doi.org/10.3390/catal11020206>.

[29] M. Dębowski, A. Iuliano, A. Plichta, S. Kowalczyk, Z. Florjanczyk, ' Chemical recycling of polyesters, *Polim. /Polym.* 64 (2019) 764–776, <https://doi.org/10.14314/POLIMERY.2019.11.5>.

[30] M.J. Kang, H.J. Yu, J. Jegal, H.S. Kim, H.G. Cha, Depolymerization of PET into terephthalic acid in neutral media catalyzed by the ZSM-5 acidic catalyst, *Chem. Eng. J.* 398 (2020), 125655, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125655>.

[31] J. Jiang, K. Shi, X. Zhang, K. Yu, H. Zhang, J. He, Y. Ju, J. Liu, From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review, *J. Environ. Chem. Eng.* 10 (2022), 106867, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106867>.

[32] E. Barnard, J.J. Rubio Arias, W. Thielemans, Chemolytic depolymerisation of PET: A review, *Green. Chem.* 23 (2021) 3765–3789, <https://doi.org/10.1039/d1gc00887k>.

[33] A.B. Raheem, Z.Z. Noor, A. Hassan, M.K. Abd Hamid, S.A. Samsudin, A.H. Sabeen, Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene

terephthalate wastes for new materials production: A review, *J. Clean. Prod.* 225 (2019) 1052–1064, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.019>.

[34] A.M. Al-Sabagh, F.Z. Yehia, G. Eshaq, A.M. Rabie, A.E. ElMetwally, Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate, *Egypt. J. Pet.* 25 (2016) 53–64, <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.001>.

[35] V.A. Kosmidis, D.S. Achilias, G.P. Karayannidis, Poly(ethylene terephthalate) recycling and recovery of pure terephthalic acid. Kinetics of a phase transfer catalyzed alkaline hydrolysis, *Macromol. Mater. Eng.* 286 (2001) 640–647, [https://doi.org/10.1002/1439-2054\(20011001\)286:103.O.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1439-2054(20011001)286:103.O.CO;2-1).

[36] R. Lopez-Fonseca, M.P. Gonzalez-Marcos, J.R. Gonzalez-Velasco, J.I. Gutierrez-Ortiz, Chemical recycling of PET by alkaline hydrolysis in the presence of quaternary phosphonium and ammonium salts as phase transfer catalysts, *WIT Trans. Ecol. Environ.* 109 (2008) 511–520, <https://doi.org/10.2495/WM080521>.

[37] R. Lopez-Fonseca, J.R. Gonzalez-Velasco, J.I. Gutierrez-Ortiz, A shrinking core model for the alkaline hydrolysis of PET assisted by tributylhexadecylphosphonium bromide, *Chem. Eng. J.* 146 (2009) 287–294, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.09.039>.

[38] M.C.D. Spaseska, Alkaline hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) recycled from the postconsumer soft-drink bottles, D. Spaseska, M. Civkaroska 379 *J. Univ. Chem. Technol. Metall.* 45 (2010) 379–384.

[39] A. Palme, A. Peterson, H. de la Motte, H. Theliander, H. Brelid, Development of an efficient route for combined recycling of PET and cotton from mixed fabrics, *Text. Cloth. Sustain.* 3 (2017) 2197–9936, <https://doi.org/10.1186/s40689-017-0026-9>.

[40] N.R. Paliwal, A.K. Mungray, Ultrasound assisted alkaline hydrolysis of poly(ethylene terephthalate) in presence of phase transfer catalyst, *Polym. Degrad. Stab.* 98 (2013) 2094–2101, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.06.030>.

[41] Eunomia, Zero Waste Europe, How circular is PET?. (2022). <<https://zerowaste-europe.eu/library/how-circular-is-pet/>> , (accessed 3 February 2022).

[42] M. De Smet, M. Linder, A circular economy for plastics – Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions, (2019). <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/33251cf9-3b0b-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-87705298>> , (accessed 12 February 2022).

[43] J. Payne, P. McKeown, M.D. Jones, A circular economy approach to plastic waste, *Polym. Degrad. Stab.* 165 (2019) 170–181, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.014>.

[44] S. Huysveld, K. Ragaert, R. Demets, T.T. Nhu, D. Civancik-uslu, M. Kusenberg, Technical and market substitutability of recycled materials: Calculating the environmental

benefits of mechanical and chemical recycling of plastic packaging waste, *Waste Manag* 152 (2022) 69–79, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.006>.

[45] G.P. Karayannidis, A.P. Chatziavgoustis, D.S. Achilias, Poly(ethylene terephthalate) recycling and recovery of pure terephthalic acid by alkaline hydrolysis, *Adv. Polym. Technol.* 21 (2002) 250–259, <https://doi.org/10.1002/adv.10029>.

[46] A. Bolanle, Z. Zainon, A. Hassan, M. Kamaruddin, A. Hamid, S. Amril, A. Hussein, Current developments in chemical recycling of post-consumer polyethylene terephthalate wastes for new materials production: A review, *J. Clean. Prod.* 225 (2019) 1052–1064, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.019>.

[47] C.T. de, M. Soares, M. Ek, E. Ostmark, " M. Gallstedt, " S. Karlsson, Recycling of multimaterial multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios, *Resour. Conserv. Recycl.* 176 (2022), 105905, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105905>.

[48] Rodrigo Elizalde Segovia. "Determinación de las condiciones de reacción de la hidrólisis de poli (tereftalato de etileno) y la esterificación de su producto para producir un plastificante." Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, asesorada por M. Javier Cruz Gómez. UNAM, 2016

Producción sostenible de glucosa a partir de bagazo de caña: Efectos de pretratamientos y ultrafiltración enzimática

Monterd-Hernández, C.I.,¹ Infanzón-Rodríguez, M.I.², Aguilar-Uscanga, M.G.², López-Zamora, L^{1*}.

¹Tecnologico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México.

²Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Miguel Ángel de Quevedo 2779, Formando Hogar, Veracruz, Ver. 91897, México.

M17010625@orizaba.tecnm.mx

maria.ir@veracruz.tecnm.mx

maria.au@veracruz.tecnm.mx

leticia.lz@orizaba.tecnm.mx

1. Resumen

Este estudio investiga la producción de glucosa a partir de bagazo de caña mediante hidrólisis enzimática utilizando *Aspergillus niger* ITV02. Se destaca la relevancia del bagazo como materia prima sostenible, dada su abundancia y bajo costo en regiones con fuerte actividad azucarera. Se evaluaron diferentes métodos de pretratamiento y condiciones experimentales, encontrando que la hidrólisis ácida-alcalina del bagazo deslignificado mejora la accesibilidad de las enzimas, resultando en un rendimiento óptimo de glucosa (36.6 g/L). La ultrafiltración del extracto enzimático incrementó significativamente la actividad de las celulasas, con aumentos del 527% en exoglucanasa y 789.83% en β -glucosidasa. Los resultados sugieren que la optimización de las condiciones de hidrólisis y el uso de enzimas ultrafiltradas son cruciales para maximizar la conversión de biomasa lignocelulósica en azúcares fermentables, contribuyendo así a la sostenibilidad en la producción de bioetanol.

2. Introducción

La producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica ha emergido como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, destacándose el bagazo de caña de azúcar por su abundancia y bajo costo, particularmente en regiones con una fuerte industria azucarera como Veracruz. El bagazo, rico en celulosa, hemicelulosa y lignina, sirve como materia prima fundamental para la generación de bioetanol y otros productos de alto valor agregado mediante procesos químicos y biológicos.^[1]

Un paso crítico en este proceso es la hidrólisis enzimática, que descompone los polisacáridos de celulosa y hemicelulosa en azúcares fermentables. Comparado con la hidrólisis ácida, la hidrólisis enzimática presenta ventajas significativas, como mayor especificidad, menor formación de inhibidores y condiciones operativas más suaves, lo que optimiza la eficiencia y sostenibilidad del proceso.^[2]

La utilización de enzimas aisladas obtenidas de hongos filamentosos como *Aspergillus*, *Penicillium*, y *Trichoderma*, representa una oportunidad económica en la producción de biocombustibles como el bioetanol, debido a su alta especificidad y eficiencia catalítica, ofreciendo una adaptación superior a las condiciones del proceso, mejorando la conversión de polisacáridos en azúcares fermentables debido a su alta especificidad, estabilidad a temperaturas y pH elevados, y ausencia de inhibición por sustrato.^[3]

En este estudio se evaluó la eficiencia del proceso de hidrólisis enzimática en la producción de bioetanol a partir del bagazo de caña de azúcar. Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los pretratamientos aplicados para analizar la conversión de azúcares, empleando *Aspergillus niger* ITV02. Además, se implementó una ultrafiltración de membrana con el objetivo de mejorar la actividad de las celulasas lo cual contribuyó a incrementar la eficiencia en la producción de bioetanol de segunda generación (2G).

3. Condiciones experimentales

El bagazo de caña (BCA) fue adquirido a través del Instituto Nacional de Investigación Forestal, Veracruz, Ver, se sometió a un proceso de molienda, con un molino marca TILCA de 12 in, para la extracción del jugo y la obtención del bagazo. El bagazo se sometió a secado solar hasta alcanzar una humedad menor al 10%, y posteriormente se redujo su tamaño de 4-6 cm, empleando una ensiladora para verde seco, Avante Agrícola modelo PG-5000, El BCA fue sometido dos pretratamientos para la obtención de celulosa y su posterior uso para generar glucosa. Se caracterizó el BCA y la biomasa para la determinación de carbohidratos estructurales de ambos pretratamientos, mediante la técnica del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL).^[4]

3.1 Condiciones para la etapa de hidrólisis ácida.

Para la etapa de hidrólisis ácida, el BCA se mezcló con una solución de H_2SO_4 al 3% p/p, y una relación líquido-sólido (RLS) 10:1 mL/g^[5]; las muestras se introdujeron en una autoclave marca Felisa modelo FE339 a 121 °C durante 15 min, el bagazo de caña de azúcar hidrolizado (BCAc), se exprimió, a fin de separar la fracción líquida y el bagazo sólido pretratado. Finalmente, el BCAC se lavó con agua corriente, para incrementar su pH a 7 aproximadamente.

3.2 Condiciones para la etapa de hidrólisis alcalina.

El BCAC, se trató con H_2O_2 al 9% p/p y una RLS 10:1 mL/g^[5]; una vez humedecido se añadió gradualmente la solución de NaOH al 40 % hasta alcanzar un pH de 11.5, con un tiempo de cinética de 36 h. Transcurrido este tiempo, se exprimió el bagazo de caña hidrolizado alcalino (BCAI) para separar la fracción líquida y el BCAI. Posteriormente se realizaron lavados con agua, a fin de reducir su pH a 7.8 aproximadamente.

3.3 Medio de cultivo.

El hongo *Aspergillus niger* ITV02 se mantuvo a 30°C en placas de agar con extracto de levadura, peptona de caseína, glucosa y harina de sorgo, con gentamicina para prevenir el crecimiento bacteriano durante 6-7 días. El pH se ajustó a 5.5 con H_3PO_4 al 5%, y se esterilizó en autoclave Felisa modelo FE339 a 121°C por 15 min.

3.4 Medio de adaptación a nivel matraz

El hongo se adaptó en un medio sintético de 200 mL con extracto de levadura, peptona, glucosa y carboximetilcelulosa de sodio (CMC), ajustado a pH 5.5 y esterilizado en una autoclave Felisa modelo FE339 a 121° C durante 15 min. Se incubó a 30°C y 200 rpm por 24 h en 4 matraces Erlenmeyer de 150 ml que contuvieron 50 ml de medio de volumen definido. La cantidad de hongo transferido se calculó usando una ecuación 1 y 2 para el de conteo de esporas de los cuales se transfirieron 2978 µL del hongo a cada matraz.

$$cel/mL = \frac{\bar{x} \cdot D \cdot 1 \times 10^6}{20} = x \text{ cel/mL} \quad (1)$$

$$\mu L = \left(\frac{6 \times 10^6 \text{ cel/mL} \cdot \text{Volumen del Medio (mL)}}{x \text{ cel/mL}} \right) * 100 \quad (2)$$

Donde: $\bar{x}$ es la media de esporas contadas en la cámara de Tommen, D es la dilución de la muestra definida por la ecuación 3.

$$\text{Dilución} = \frac{\text{Volumen total}}{\text{Volumen de la muestra}} \quad (3)$$

3.5 Medio de fermentación a nivel matraz

La fermentación se realizó en un medio de 2 L distribuido en 4 matraces de 1L con 500 mL del medio compuesto: extracto de levadura, KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, Urea, CaCl_2 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, peptona y Tween 80, ajustado a pH 5.5 y esterilizado en una autoclave Felisa FE339. Se añadieron 20 g de de BCAI RLS 10:1 mL/g; H_2O_2 9 % p/p; tiempo de cinética de 36 h se le suministro 500 µL de medio Mandels a cada matraz, incubándose a 31°C y 200 rpm por 168 horas en una incubadora STIK, modelo PSB2125, México. El fermentado se centrifugó a 5000 rpm por 20 min en tubos falcon de 50 mL en una Centrífuga 5804 R Marca eppendorf..

3.6 Ultrafiltración por membrana

Se realizó una filtración por membrana de 10 kDa suministrándole nitrógeno 1bar con una capacidad de trabajo de 300 mL.

3.7 Determinación de la actividad enzimática celulasas

Actividad en papel filtro (FPasa) fue cuantificado de acuerdo a Ghose (1989) ^[6]. Los azúcares reductores fueron cuantificados por el método DNS ^[7], como muestra en la Figura 1.

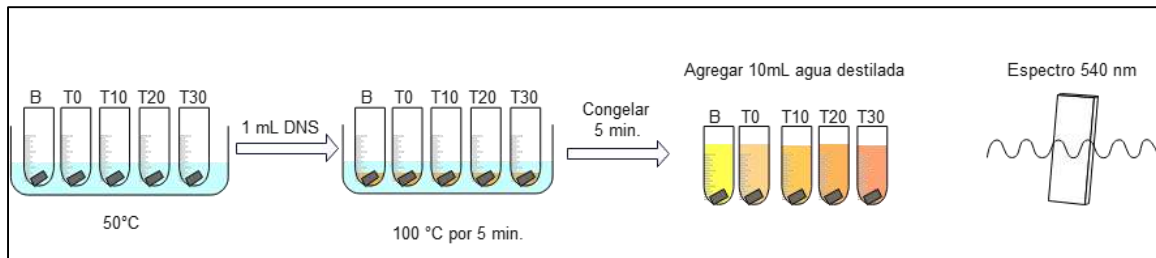


Figura 1. Metodología para medir la actividad exoglucanasa (FPasa).

La actividad endoglucanasa (CMCasa) fue medida por la liberación de azúcares reductores que fueron cuantificados por el método DNS (Dinitrosalicylic Acid) ^[7], como se muestra en la Figura 2. usando el extracto enzimático en un buffer de acetato de sodio de pH 5, 0.05 M.

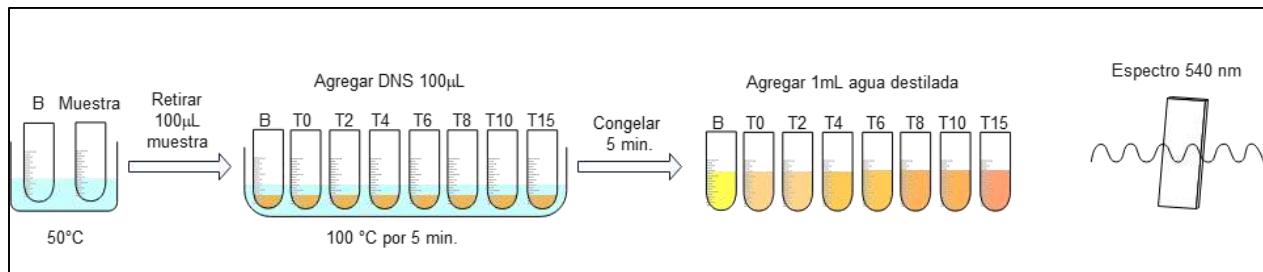


Figura 2. Metodología para medir la actividad endoglucanasa (CMCasa).

La actividad β -glucosidasa (BGL) fue determinada usando 10 mM 4-nitrophenyl β -D-glucopyranoside (β -pNPG, Sigma) como sustrato en 0.05 M buffer de acetato de sodio, pH 5. La reacción fue mezclada incubando el sustrato con el extracto enzimático a 50°C por 10 min; la reacción fue detenida por agregar 2 mL de Na_2CO_3 0.2 M a 1 mL de mezcla de reacción como muestra en la Figura 3.

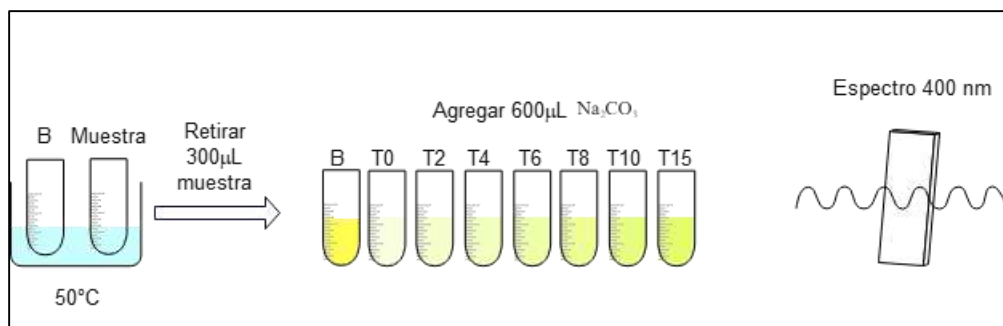


Figura 3. Metodología para medir la actividad β -glucosidasa (BGL).

3.7 Condiciones para la etapa de hidrólisis enzimática

Se realizaron dos tratamientos, cuyas condiciones se muestran en la Tabla 1, para 1 g de celulosa del BCAI, se consideró un RLS 10:1 mL/g de sustancia amortiguadora con extracto de *Aspergillus niger* ITV02 ultrafiltrada a 50°C y 250 rpm en una incubadora STIK, modelo PSB2125, México. La solución amortiguadora se preparó con 2.6 g/L C₂H₃NaO₂ y 1 mL/L CH₃COOH a pH 5.

Tabla 1. Condiciones de hidrólisis enzimática

	Tratamiento 1	Tratamiento 2
Solución amortiguadora (mL)	2	6
Extracto de <i>Aspergillus niger</i> ITV02 (mL)	8	4

Una vez transcurrido el tiempo de reacción, las muestras fueron retiradas del matraz y sometidas a centrifugación (Centrífuga Eppendorf 5804R) durante 20 min a 5,000 rpm, para separar la biomasa. Posteriormente, el sobrenadante se almacenó en tubos Eppendorf de 2.5 mL. Las muestras se prepararon para la cuantificación de glucosa mediante Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento (HPLC) SHIMADZU modelo serie LC-2050.

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización de la fuente de carbono

La caracterización del BCA reveló un contenido de 40.85% de celulosa, 25.4% de lignina y 28.26% de hemicelulosa, valores que son consistentes con la composición promedio reportada en la literatura, la cual indica un contenido de 38.4% de celulosa, 23.2% de hemicelulosa y 25% de lignina.^[9] En la Tabla 2 se muestra el proceso de remoción de hemicelulosa y lignina durante los pretratamientos aplicados. Se observó una reducción del 51.63% en hemicelulosa, atribuida a la acción del ácido, que descompone las estructuras hemicelulósicas facilitando su disolución. La lignina, por su parte, experimentó una reducción inicial del 11.2% en esta etapa.

Tabla 2. Condiciones de hidrólisis enzimática

	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Bagazo crudo	40.9	28.3	25.4
Bagazo ácido	65.84	13.69	22.6
Bagazo ácido - alcalino	70.78	18.45	6.1

En una fase posterior, la aplicación de peróxido de hidrógeno en combinación con hidróxido de sodio (NaOH) demostró ser altamente eficaz para oxidar y desintegrar las estructuras lignocelulósicas, facilitando la eliminación de la lignina residual, un componente estructural clave que aporta color y rigidez a las fibras^[10]. Este tratamiento produjo una reducción del 73.01% en lignina. Adicionalmente, estos procesos mejoraron significativamente la pureza de la celulosa en el bagazo, incrementando su porcentaje en cada etapa de tratamiento. El pretratamiento alcalino provocó un blanqueamiento del material debido a la eliminación de la lignina (Figura 4), mejorando su idoneidad para aplicaciones industriales como la producción de.^[11]



Figura 4. Estructura física del bagazo de caña crudo y con proceso ácido-alcalino.

4.2 Producción de celulasas de *Aspergillus niger* ITV02

En la Tabla 3 se presenta una comparación detallada de la actividad de las enzimas celulasas producidas por el hongo *Aspergillus niger* bajo diversas condiciones operativas, utilizando como fuente de carbono bagazo de caña. Los resultados obtenidos en este estudio muestran una mejora en la actividad enzimática en comparación con los datos reportados por Miranda (2019).^[12] Esta mejora se atribuye a las condiciones óptimas de tiempo cinético y temperatura, así como a la adecuación de la fuente de carbono. Infazón *et al* (2022)^[13] empleó condiciones experimentales similares, obteniendo un rendimiento superior en la actividad de las celulasas.

El bagazo deslignificado ofrece una mejor accesibilidad para las enzimas debido a la reducción de la lignina, lo cual facilita la acción de las celulasas sobre la celulosa. Se ha reportado que la mejora en la actividad enzimática se debe a una conservación más

eficiente de la celulosa durante el pretratamiento ^[10], por ende, en el estudio de Infazón *et al* (2022) ^[13], el bagazo deslignificado presentó una composición de 54% de celulosa, 27.88% de hemicelulosa y 18.2% de lignina, en comparación con el bagazo utilizado en esta investigación con: 48.4% de celulosa, 35% de hemicelulosa y 17.5% de lignina.

Tabla 3. Resultados de actividad de celulasas sin ultrafiltrar en comparación con otros autores

Autor	Condiciones	FPasa (U/mL)	CMCasa (U/mL)	β-glucosidasa (U/mL)
Miranda (2019)	Hidrólisis alcalina RLS 10:1 mL/g, H ₂ O ₂ al 6 % p/p, 120 h, 10 g/L, 30°C, pH 5.5 a 250 rpm,	0.095	0.013	2.19
Infanzón <i>et al.</i> , (2022)	Hidrólisis alcalina RLS 12:1 mL/g, H ₂ O ₂ al 6 % p/p, 168 h, 20 g/L, 31°C pH 6 a 200 rpm	0.47	0.5	12.6
Esta investigación	Hidrólisis alcalina RLS 10:1 mL/g, H ₂ O ₂ al 9 % p/p, 168 h, 20 g/L, 31°C, pH 5.5 a 200 rpm	0.15	0.44	4.88

La aplicación de la ultrafiltración no solo mejora la pureza de las enzimas, sino que también optimiza la concentración y el intercambio de amortiguadores, debido a su capacidad para separar y concentrar biomoléculas de alto peso molecular sin afectar su actividad, por este motivo facilita su uso en procesos bioquímicos y de producción. ^[14]

En la Tabla 4 se observa que esta investigación alcanzó una mayor actividad en comparación con Infazón *et al* (2021) ^[15], con excepción de la actividad de CMCasa. Esto se puede atribuir a la composición del bagazo de sorgo, que contiene 63.8% de celulosa, 18.17% de hemicelulosa y 3.3% de lignina. Las enzimas producidas en un medio con bagazo de sorgo pueden estar adaptadas para atacar estructuras celulósicas menos cristalinas, lo que resulta en una mayor actividad CMC en esta biomasa.

La necesidad de concentraciones elevadas de β-glucosidasa (BGL) es importante, dado que esta enzima hidroliza la celobiosa en unidades de glucosa. La ausencia de BGL en un extracto enzimático provoca la acumulación de celobiosa, lo que inhibe a las endo-glucanasas y exo-glucanasas, reduciendo la capacidad de hidrólisis enzimática. ^[16], como resultado, el bagazo de caña se presenta como un mejor sustrato debido a su mayor

actividad de BGL, con un rendimiento hasta 40 veces superior. Finalmente, no se observaron diferencias significativas en los valores de FPasa entre las dos fuentes de carbono evaluadas.

Tabla 4. Resultados de actividad de enzima ultrafiltrada con diferente fuente de carbono

Autor	Condiciones	FPasa (U/mL)	CMCasa (U/mL)	β-glucosidasa (U/mL)
Infanzón <i>et al.</i> , (2021)	Bagazo de sorgo. Hidrólisis alcalina RLS 16:1 mL/g, H_2O_2 al 6 % p/p, pH 5.5 a 250 rpm, 30° C y 10 g/L	1	11.76	1.32
Esta investigación	Bagazo de caña Hidrólisis alcalina RLS 10:1 mL/g, H_2O_2 al 9 % p/p, pH 5.5 a 200 rpm, 31° C y 20 g/L	0.989	1.16	43.47

4.3 Obtención de azúcares fermentables utilizando *Aspergillus niger* ITV02

Comparando los resultados obtenidos en la Tabla 5, a las 48 h, Infazón *et al* (2021)^[15], reportó valores de glucosa por debajo de los obtenidos en esta investigación, empleando la enzima ultrafiltrada a base de sorgo, con diferentes biomاسas en la etapa de hidrólisis enzimática, siendo el bagazo de caña el que presenta una mejor conversión de glucosa por el pretratamiento empleado ya que obtuvo la mayor conservación de celulosa al 70.8% y una deslignificación del 75.92%

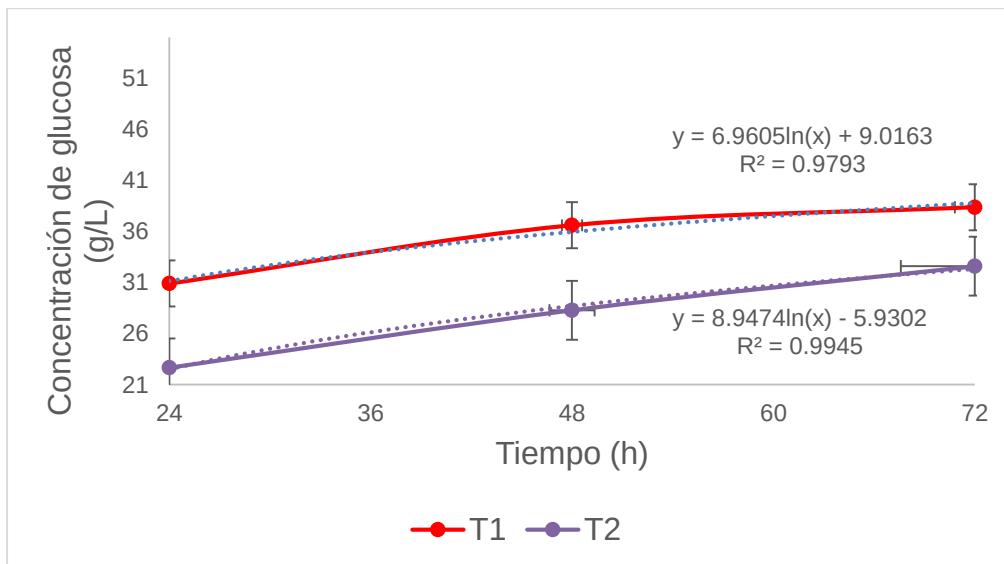
Tabla 5. Glucosa obtenida a las 48 h con enzima ultrafiltrada en diferente biomasa pretratada

Autor	Biomasa	Pretratamiento	Glucosa (g/L)
Infazón <i>et al</i> (2021)	Paja de Trigo	Explosión de vapor	24.58 $\pm$ 0.08
Infazón <i>et al</i> (2021)	Rastrojo de maíz	Hidrólisis Alcalina	2.1 $\pm$ 0.01
Esta investigación	Bagazo de Caña	Hidrólisis Ácida-Alcalina	36.6 $\pm$ 0.6

Uno de los principales factores que afectan el rendimiento y la velocidad inicial de la hidrólisis enzimática es la concentración del sustrato (celulosa y/o hemicelulosa), puesto que, altas concentraciones de sustrato pueden causar inhibición, problemas en el mezclado, y transferencia de masa, disminuyendo la velocidad de hidrólisis.^[17] El grado

de inhibición depende de la proporción de la enzima-sustrato, por lo tanto, la concentración y calidad de sustrato, el método de pretratamiento adecuado, la actividad de las enzimas, la temperatura, pH, y mezclado son los principales factores a controlar en la hidrólisis enzimática de materiales lignocelulósicos. Como se puede apreciar en la Figura 5, el tratamiento 1 muestra que al emplear 8 mL de enzima ultrafiltrada de la hora 24 a la 72 se obtuvo un incremento de glucosa del 26.28 g/L. En tanto con el tratamiento 2 donde se emplearon 4 mL de enzima ultrafiltrada, el incremento de la hora 24 a la 72 fue del 58.36 g/L.

Figura 5. Cinética de hidrólisis enzimática utilizando *Aspergillus niger* ultrafiltrado.



5. Conclusiones

El proceso de ultrafiltración aplicado al extracto de *Aspergillus niger* ITV02 resultó en un aumento significativo del coctel enzimático, con incrementos del 527% en exoglucanasa, 159% en endoglucanasas y 789.83% en β -glucosidasa. Para la degradación completa de 1 g de celulosa, se requiere una actividad adecuada de la enzima Fpasa, obteniéndose en esta investigación una actividad de Fpasa de 0.98 U/mL, por lo que se emplearon 8 mL para una hidrólisis eficiente. En la conversión de celulosa a glucosa, el Tratamiento 1 generó 15% más de glucosa en comparación con el Tratamiento 2, debido al uso del doble de enzima. Este resultado sugiere que combinar la enzima *Aspergillus niger* ITV02 con una enzimática comercial en dosis mínimas podría

incrementar sustancialmente la obtención de azúcares fermentables, mejorando así su aplicación en la producción de bioetanol (2G).

6. Bibliografía

4. de Armas, A.C., Morales, M., Albornas, Y., González, E. Proyección de una industria azucarera para transformarse en una biorrefinería a partir de biocombustibles de segunda y tercera generación. *Tecnología Química*. 39(3): 489-507. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852019000300489. (2019)
5. Gutiérrez V., Aixa R., Céspedes G., De Armas M., Albornas, A., Villanueva, Y. y Ramos, G. Valorización de la Lignina en el concepto de Biorrefinería. *Centro Azúcar*. 47(3): 95-105. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S22234861202000030009&lng=es&tlng=es. (2020)
6. Gozalbo, J. A., Medina, I. T., Munoz, M. G. A., Candela, G. D., Carrillo, L. M. Fungal enzymes in the industrial production of biofuels and biochemicals. *Microorganisms*. Retrieved from doi: [10.1007/s00253-011-3473-2](https://doi.org/10.1007/s00253-011-3473-2). (2011).
7. Sluiter A., Hames B., Ruiz R., Scarlata C., Sluiter J., Templeton D., Crocker D. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory analytical procedure. <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy13/42618.pdf>. 2008
8. Moran, MG. Estudio de la sacarificación del bagazo de caña de azúcar y *Agave angustifolia* para la producción de azúcares fermentables. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Veracruz. 2018.
9. Ghose TK. Measurement of cellulase activities. *Pure Appl Chem* 59(2),257– 268. Biochemical Engineering Research Centre. Indian Institute of Technology, New Delhi-110016, India. Printed in Great Britain. 1987.
10. Miller GL. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Anal Chem* 31:426–428. doi: [10.1021/ac60147a030](https://doi.org/10.1021/ac60147a030). (1959).
11. Partida, S.G. Producción de etanol a partir de bagazo de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) mejorado genéticamente. Tesis doctoral. Instituto Tecnológico de Veracruz. 2017
12. Saraswathi, N., Kit, L., Hui, C., Ahmad, H., Bin, A., Boon, K., Huang, M. Biobutanol production from sugarcane bagasse by *Clostridium beijerinckii* strains. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 67(5), 1-7. <https://doi.org/10.1002/bab.1865> . 2019.
13. Silva, C. M., Matos, M., Rocha, G. J. M. Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 12(2), 277-289. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02200-1>. (2023).
14. Silva, C. O., Vaz, R. P., Filho, E. X. Bringing plant cell wall-degrading enzymes into the lignocellulosic biorefinery concept. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 12(2), 277–289. <https://doi.org/10.1002/bbb.1850>. (2018).
15. Miranda A.S.. Producción De Celulasas De *Aspergillus Niger* Itv-02. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico De Veracruz, Veracruz, México. 2019
16. Infanzón-Rodríguez, M. I., del Moral, S., Castro-Martínez, C., et al. Multi-response optimization using the desirability function of exoglucanases, endoglucanases and β -glucosidases production by *Aspergillus niger* ITV-02 from delignified sugarcane bagasse. *Sugar Tech*, 25(1), 86–98. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01191-7>. (2022).
17. Tavares, A. P. M., Rosales, M., Lima, S. A. C., Carvalho, M. G. V. S., Silvestre, L. Enzyme-Driven Bioprocesses for Sustainability: Current Trends and Perspectives. In A. P. M. Tavares & R. Rosales (Eds.), *Sustainable Catalysis* (pp. 293–310). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42999-6_10. (2024).

18. Infanzón-Rodríguez, M. I., Ragazzo-Sánchez, J. A., del Moral, S., Calderón-Santoyo, M., & Aguilar-Uscanga, M. G. Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass using native cellulase produced by *Aspergillus niger* ITV02 under liquid state fermentation. *Biotechnology and Applied Biochemistry*. doi:10.1002/bab.209710.1002/bab.2097. (2021).
19. Singhanian, R. R., Sukumaran, R. K., Rajasree, K. P., Mathew, A., Gottumekkala, L., Pandey, A. Properties of a major β -glucosidase-BGL1 from *Aspergillus niger* NII-08121 expressed differentially in response to carbon sources. *Process Biochemistry*, 46(7), 1521–1524. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.03.019>. (2011).
20. Sun, Y., and Cheng, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology* 83(1), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00212-7) . (2002).

Optimización Bayesiana para el diseño secuencial de experimentos de un proceso de captura de CO₂

García, D.A, Gutiérrez, M.A., Zamora G.E., Colín, J.A.

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Departamento de Energía, CDMX, 02200, México.

diana.alejandra0810@gmail.com, magl@azc.uam.mx, gregorio-zamora@hotmail.com, jacl@azc.uam.mx

1. Resumen

En este trabajo se aplicó la optimización Bayesiana para estimar secuencialmente las condiciones óptimas para alcanzar la máxima adsorción de CO₂ en una SBA-15 modificada con ceria a diferentes relaciones $m_{\text{soporte}}/m_{\text{CeO}_2}$. Los resultados arrojaron que, a 304 kPa, 376 K, un flujo de alimentación de 0.1 cm/s y una relación soporte-ceria igual a 10 se tendrá la máxima adsorción (90.72 mgCO₂/g_{ads}). Por lo que esta técnica permitiría reducir la cantidad de experimentación requerida para la validación del modelo matemático contribuyendo a la búsqueda de soluciones eficientes y sustentables con el medio ambiente.

2. Introducción

El cambio climático es una crisis global que ha ganado una creciente atención en los últimos años. El estado actual de nuestro planeta se caracteriza por el aumento en la temperatura global, el derretimiento de los casquetes polares, eventos climáticos extremos frecuentes y patrones climáticos cambiantes ^[1]. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) informó que las temperaturas globales aumentaron aproximadamente 1 °C por encima de los niveles preindustriales

en 2017^[2]. La causa se ha atribuido a las actividades antropogénicas que liberan CO₂, a través de la combustión de combustibles fósiles, la deforestación y varios procesos industriales. La ONU ha advertido sobre el efecto perjudicial para los ecosistemas, si las temperaturas globales aumentan 1.5 °C por encima de los niveles históricos. Una respuesta es el compromiso adquirido en el Acuerdo de París, según el cual los países más industrializados disminuirán sus emisiones de CO₂ para evitar el aumento de la temperatura global. Por lo tanto, para mitigar el impacto de las emisiones de CO₂ se deben desarrollar tecnologías eficientes de captura de CO₂ con un objetivo ambicioso de cero emisiones netas para 2050^[3].

La captura y almacenamiento de CO₂ (CCS) se considera una tecnología vital para reducir dichas emisiones. Entre las tecnologías de CCS destaca la adsorción de CO₂ postcombustión debido a su potencial en el consumo energético y su fácil adaptación con una integración mínima en las plantas existentes. Más importante aún, ofrece la flexibilidad de captura de CO₂ en diferentes industrias debido a sus diferentes modos de regeneración del adsorbente (cambios de temperatura/presión) y tipos de adsorbedores^[4]. Además, el desarrollo de estas nuevas tecnologías pueden ser respaldadas con la implementación de modelos matemáticos, ya que contienen parámetros que representan las características físicas del sistema y que pueden ser evaluadas sin necesidad de consumir recursos y tiempo para su evaluación experimental.

Los valores de estos parámetros son estimados para que una variable física observada experimentalmente coincida con la predicción correspondiente del modelo, en conjunto se puede optimizar el proceso con un enfoque secuencial, es decir, las estimaciones de los parámetros obtenidos del conjunto de evaluaciones realizadas previamente se consideran como valores nominales, y la nueva evaluación se diseña para mejorar la adecuación de la estimación. La secuencia de estimación de parámetros y evaluación se repite iterativamente hasta que se cumple el objetivo, este es el principio de la optimización Bayesiana ^[5]. De esta manera, implementar un conjunto de diversas técnicas computacionales permitirá reducir tiempos y costos de experimentación, así como determinar las condiciones óptimas de operación para la máxima adsorción de CO₂.

Por lo tanto, en el presente trabajo se plantea utilizar un modelo matemático reportado en la literatura como laboratorio virtual, donde se determinarán las curvas de ruptura y la capacidad de adsorción de los adsorbentes propuestos, y mediante optimización Bayesiana se determinarán las condiciones óptimas de operación para la máxima adsorción de CO₂.

2.1 Modelado matemático

Para la realización de este trabajo, el modelo matemático fungirá como un laboratorio que describe la dinámica del adsorbedor de lecho fijo suponiendo que opera como flujo pistón. Se consideran las siguientes suposiciones para el modelo matemático: 1) Las partículas adsorbentes se consideran una sola fase homogénea; 2) La concentración y distribución de temperatura radial son despreciables. 3) La conducción térmica dentro de la pared de la columna a lo largo de la dirección axial es insignificante. 4) El

comportamiento de la mezcla se considera como gas ideal. 5) Se considera que la fase gaseosa y el adsorbente se encuentran en equilibrio térmico. 6) La caída de presión y la resistencia a la transferencia de masa son despreciables.

Los balances de materia y energía se presentan en las ecuaciones (1) y (2):

$$\frac{(\partial C_i)}{\partial t} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon \rho_s} \frac{\partial q_i}{\partial t} + \frac{1}{L} \frac{\partial (u C_i)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\left(\varepsilon \rho_g C_{p_g} + (1+\varepsilon) \rho_s C_{p_s} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = (1-\varepsilon) \rho_s \sum_{j=1}^2 (-\Delta H_{ij}) \frac{\partial q_{ij}}{\partial t} + \rho_g \frac{C_g}{L} \frac{\partial (u T)}{\partial z} + \frac{2h_i}{r_{bi}} (T - T_w) \quad (2)$$

Donde C_i representa la concentración del componente i en mol/cm³, q_i la cantidad adsorbida del componente i en mol/g_{ads}, ε es la porosidad del lecho, ρ_s la densidad del adsorbente en g/cm³, L la longitud del lecho en cm y u la velocidad intersticial en cm/s, ρ_g representa la densidad del gas en g/cm³, C_g es el calor específico del gas en J/g·K, C_s es el calor específico del adsorbente en J/g·K, T la temperatura del gas en K, ΔH_i el calor de adsorción del componente i en J/mol, h_i el coeficiente de transferencia de calor interno del componente i en J/cm²·s·K, r_{bi} el radio interno del lecho en cm y T_w la temperatura de la pared del lecho en K. La cinética de adsorción para determinar el grado de separación que puede ser logrado en el sistema, se determinó empleando el modelo de la fuerza motriz lineal (LDF, por sus siglas en inglés) propuesta por Glueckauf y Coates en 1947^[5], ecuación (3):

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = K_i^L (q_i^* - q_i) \quad (3)$$

Donde K_i^L es el coeficiente global de transferencia de masa para un modelo lineal, s⁻¹, q_i^* la cantidad máxima adsorbida de la especie i en mol/g_{ads}.

2.2 Optimización Bayesiana

La optimización Bayesiana (OB) parte del teorema de Bayes, el cual se expresa a través de la ecuación (1):

$$P(H|D) = \frac{P(D|H) P(H)}{P(D)} \quad (1)$$

Donde H representa la función objetivo desconocida $f(x)$; $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ representa el conjunto de datos observados; $P(D|H)$ representa la distribución de probabilidad de verosimilitud de $f(x)$, también llamada “ruido” debido a errores inevitables en la observación; $P(H)$ representa la distribución de probabilidad previa, es decir, la suposición sobre $f(x)$; $P(D)$ se expresa como la distribución de verosimilitud marginal o evidencia de la función objetivo desconocida, para la cual generalmente es difícil obtener una fórmula analítica clara debido a la dificultad del cálculo, por lo que se utiliza principalmente para optimizar hiperpárametros; $P(H|D)$ se expresa como la distribución de probabilidad posterior de $f(x)$, que representa la confianza en la función objetivo desconocida después de que la previa se modifica con el conjunto de datos conocidos. En la OB se establecen límites en el espacio de búsqueda, ya que, definir límites claros restringe el área donde es más probable encontrar soluciones óptimas y esto hace que el proceso de búsqueda sea más eficiente [6].

3. Condiciones experimentales

Se consideró un proceso de adsorción a escala laboratorio con un adsorbente de 0.44 cm de diámetro interno y 11.9 cm de longitud a 298 K y 101.3 kPa, con una alimentación de una mezcla de gases 20 % CO₂ balance N₂ a velocidad de 0.05 cm/s. utilizando como adsorbente SBA-15 modificada con óxido de cerio. Las propiedades texturales de la SBA-15, determinadas por análisis de fisisorción de nitrógeno son: $S_{BET} = 750 \text{ m}^2/\text{g}$, $V_p = 1.27 \text{ cm}^3/\text{g}$ y $D_p = 6.79 \text{ nm}$.

Posteriormente, mediante un promedio ponderado se estimaron las propiedades fisicoquímicas de los adsorbentes modificados con ceria a diferentes relaciones másicas, $m_{\text{soporte}}/m_{\text{CeO}_2} = 2, 4, 6, 8$ y 10 , las cuales se identifican como S_{Ce-2}, S_{Ce-4}, S_{Ce-6}, S_{Ce-8} y S_{Ce-10}, respectivamente, partiendo de las propiedades fisicoquímicas de la ceria, las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la ceria^[8].

Propiedad	ρ_s (cm ³ /g)	Cs (J/gK)	ΔH_{CO_2} (kJ/mol)	ΔH_{N_2} (kJ/mol)	ϵ
Valor	0.53	0.205	30	16.98	0.59

Una vez identificados los materiales y determinadas las propiedades, se empleó un modelo matemático lineal para reproducir las curvas de ruptura del CO₂ y la máxima cantidad adsorbida. El

sistema de ecuaciones (1), (2) y (3) se resolvió por el método de diferencias finitas utilizando el software Matlab.

Para las ecuaciones diferenciales se consideran las siguientes condiciones de frontera:

$$C_i(t,0)=C_{i,0}(t)$$

$$q_i(t,0)=q_{i,0}(t)$$

$$T(t,0)=T_0(t)$$

Mientras que las condiciones iniciales son:

$$C_i(0,z)=C_{i,in}(t); (0 \leq z \leq L)$$

$$q_i(0,z)=q_{i,in}(t); (0 \leq z \leq L)$$

$$T(0,z)=T_{in}(t); (0 \leq z \leq L)$$

Finalmente, se aplicó optimización Bayesiana empleando el software Phyton para determinar las condiciones de operación óptimas en el proceso que permitan obtener la máxima adsorción posible.

4. Resultados y discusión

El modelo matemático permitió estimar las curvas de ruptura para la SBA-15 modificada con ceria representadas en la Figura 1.

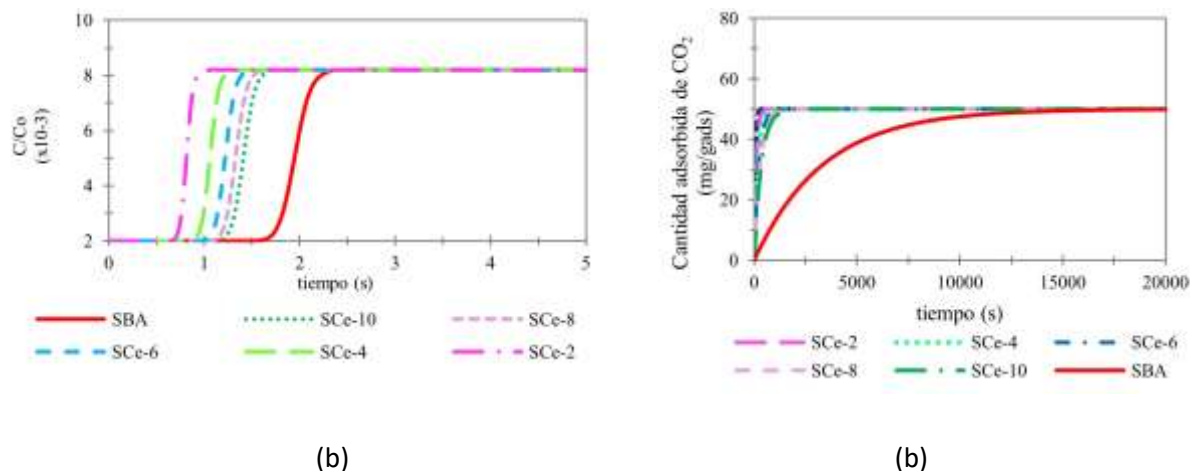


Figura 1. Adsorción de CO₂ en SBA-15 modificada con ceria: (a) curvas de ruptura y (b) cantidad adsorbida.

La Figura 1a muestra las curvas de ruptura para los diferentes sólidos, donde se aprecia que el tiempo de saturación para SBA-15 se alcanza a los 2 s aproximadamente, mientras que a mayor contenido de ceria menor tiempo de saturación. En la Figura 1b se muestra la cantidad adsorbida de CO₂ de 50 mg/g_{ads}, y se observa que la presencia de ceria no aumento la cantidad adsorbida, solo tuvo un efecto importante en la reducción del tiempo de saturación, ya que se redujo en un 75%. De acuerdo con la literatura, la ceria beneficia el proceso de adsorción debido a sus propiedades de óxido-reducción, generando vacancias de oxígeno que permiten una mayor interacción con las moléculas de CO₂ y de esta forma el proceso ocurre más rápido [7].

En cuanto a la optimización Bayesiana, en el código implementado en Phyton se establecieron como variables la presión (P), la temperatura (T) y la velocidad de alimentación de la mezcla (u) con la finalidad de obtener las condiciones óptimas de operación. Para dichas variables se establecieron límites de operación para delimitar el espacio de búsqueda con OB. Se empleo inicialmente una presión de 101.3 kPa, temperatura de 298 K y velocidad de flujo de 0.05 cm/s, la secuencia de resultados obtenidos en 20 iteraciones se muestran en la Figura 2, la cual representa los puntos iniciales (primeras iteraciones) explorando el espacio de búsqueda, a medida que avanza encuentra puntos estables, donde el algoritmo ha encontrado el conjunto de parámetros que maximizan la cantidad adsorbida. Sin embargo, en las iteraciones finales se observa una gran variación entre los puntos ya que se sigue explorando la zona de búsqueda para determinar si existe aún un mejor valor.

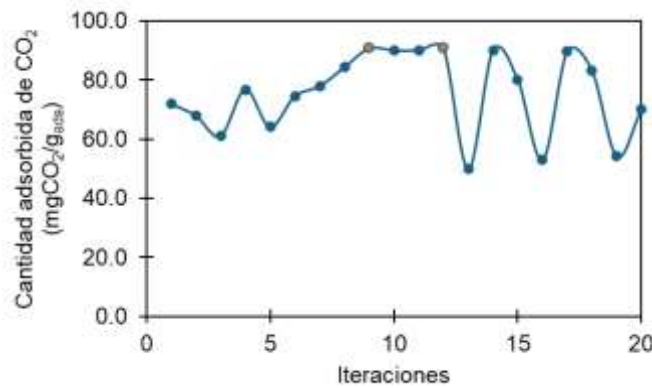


Figura 2. Exploración de zona a evaluar aplicando optimización Bayesiana.

Según lo anterior la OB equilibra la exploración de nuevas regiones del espacio de parámetros para evitar quedarse atrapado en un óptimo local. En la Tabla 2 se muestran los resultados numéricos de las diferentes combinaciones encontradas en las 20 iteraciones mostrando que existen múltiples combinaciones y ajustes de parámetros para encontrar el valor óptimo.

Después de 20 iteraciones se observó que en las iteraciones 9 y 12 se logra la misma cantidad adsorbida de CO₂, 90.72 mgCO₂/g_{ads}, ambas a una presión de 303.98 kPa y un flujo de alimentación de 0.1 cm/s, sin embargo, existe una pequeña diferencia en la temperatura de 6 K, por lo que se podría trabajar con la menor temperatura, por lo tanto, se determinó que las condiciones óptimas de operación son 303.98 kPa, 376 K y un flujo de alimentación de 0.1 cm/s para una máxima adsorción.

Tabla 2. Resultados de optimización Bayesiana.

Iteración	P (kPa)	T (K)	u (cm/s)	Cantidad adsorbida (mg CO ₂ /g _{ads})
1	185.42	443	0.100	72.0
2	167.19	327	0.183	68.1
3	138.82	367	0.457	61.1
4	210.55	384	0.716	76.9
5	150.97	475	0.124	64.3
6	198.60	382	0.692	74.6
7	216.84	383	0.376	78.0
8	256.35	375	0.389	84.4

9	303.98	382	0.100	90.7
10	302.96	380	0.309	90.1
11	297.90	378	0.209	90.0
12	303.98	376	0.100	90.7
13	101.33	376	1.000	50.0
14	298.91	374	0.402	90.1
15	302.96	372	0.192	80.2
16	110.44	372	0.512	53.0
17	295.87	299	0.127	89.7
18	249.26	301	0.597	72.0
19	114.50	298	0.515	68.1
20	177.32	379	0.182	61.1

Finalmente se realizó la comparación entre las condiciones de operación establecidas inicialmente contra las condiciones óptimas encontradas, tal como se muestra en la Figura 3.

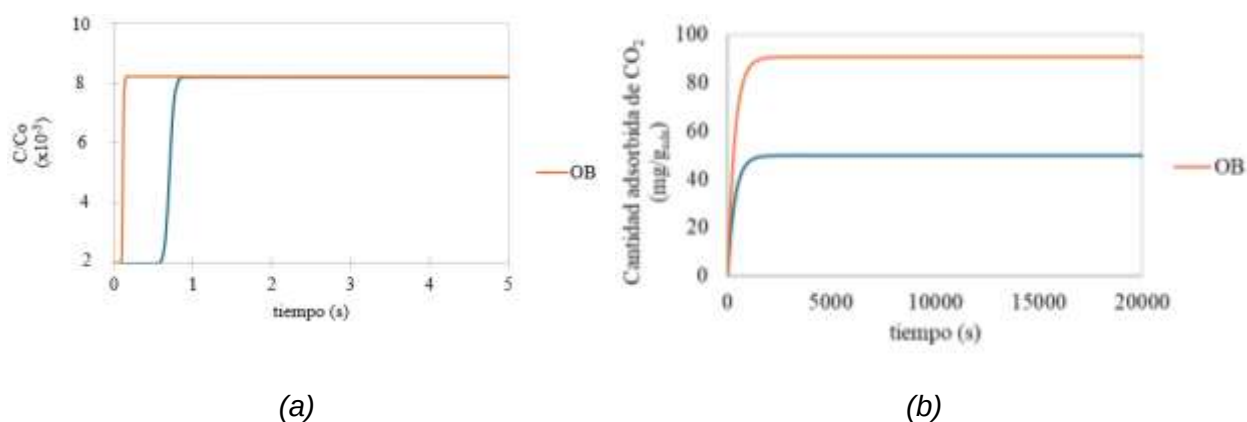


Figura 3. Adsorción de CO_2 en S-Ce-10 optimizada: (a) curvas de ruptura y (b) cantidad adsorbida.

La Figura 3a muestra las curvas de ruptura, al utilizar las condiciones óptimas se reduce el tiempo de saturación considerablemente, indicando que existe una rápida transferencia de masa propiciando la rápida adsorción de CO₂, mientras que la Figura 3b representa la cantidad adsorbida en el mismo sólido, y que las nuevas condiciones de operación incrementan la adsorción en un 80 %.

5. Conclusiones

El uso de herramientas computacionales permitió analizar un sistema de adsorción empleando como adsorbente SBA-15 modificada con ceria, demostrando que a bajos contenidos de ceria se podrá obtener una rápida adsorción, mientras que la aplicación de optimización Bayesiana muestra variabilidad, la cual refleja la exploración en el espacio de búsqueda. Esta técnica permitió encontrar las condiciones óptimas de operación para aumentar la captura de CO₂ en un 80 %. También un aumento de la presión y temperatura permitirá adsorber en una mayor proporción CO₂. Finalmente, este análisis contribuirá al desarrollo experimental en el laboratorio para la validación de un modelo matemático.

6. Bibliografía

31. Yoro K.O., Daramola M.O., CO₂ emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In *Advances in carbon capture*. Woodhead Publishing, 3-28 (2020).
32. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., et al. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C*, IPCC, Summary for policymakers (2018).
33. Soo X., Lee J., Wu W., Tao L., Wang C., Zhu Q., Bu J., *Advancements in CO₂ capture by absorption and adsorption: A comprehensive review*. J. of CO₂ Utilization, 81, 102727 (2024).
34. Dhoke C., Zaabout A., Cloete S., Amini S., *Review on reactor configurations for adsorption-based CO₂ capture*. Ind. & Eng. Chem. Research, 60 (10), 3779- 3798 (2021).
35. Won W., Lee S., Lee K., *Modeling and parameter estimation for a fixed bed adsorption process for CO₂ capture using zeolite 13X*. Separation Sci. and Tech., 45 (5), 710-719 (2010).
36. How to implement Bayesian optimization from scratch in Python, <https://machinelearningmastery.com>, (2024).
37. García Martínez Diana A., *Remoción de moléculas azufradas y nitrogenadas en combustibles fósiles por el proceso de adsorción empleando materiales mesoporosos de sílice y cinc*. Tesis de Licenciatura. UAM (2018).
38. Ruhami A., Aziz M., *Fabrication of mesoporous CeO₂-MgO adsorbent with diverse active sites via eggshell membrane-templating for CO₂ capture*. App. Physics A, 128 (1) 29 (2022).

Xylogenesi en bosques mixtos del norte de México: Lecciones preliminares.

Cuapio-Hernández, L.¹, Vivar-Vivar, E.D.², Borja-de la Rosa, M.A.¹, Pompa-García, M.²

¹División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México- Texcoco Km 38.5, 56230, Chapingo, Estado de México, México.

²Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Río Papaloapan y Blvd. Durango s/n, Col. Valle del Sur, 34120, Durango, Dgo., México.

Emails: C.-H.L.: lcuapioh@gmail.com; V.-V.E.D.: 1161194@alumnos.ujed.mx; B.- R.M.A.: MBORJAD@chapingo.mx; P.-G.M.: mpgarcia@ujed.mx

1. Resumen

Las recientes variaciones climáticas frecuentes y extremas han propiciado que los bosques sufran alteraciones en su crecimiento, lo que tiene implicaciones en su productividad. Aquí estudiamos las respuestas ante el clima de la formación cambial y desarrollo de xylema en *Pinus engelmannii* Carr. y *Juniperus deppeana* Steud, especies representativas del bosque mixto mexicano. Mediante el muestreo quincenal a lo largo de un año (2022-2023) los análisis histológicos vinculados al clima, revelaron que las variables térmicas controlan la formación de madera, más que la precipitación. Sobre todo, las temperaturas máximas, afectan la formación de madera y su desarrollo estacional. La aparición del número máximo de las células cambiales fue durante febrero y noviembre para *P. engelmannii* y *J. deppeana*, respectivamente. Las diferencias en el crecimiento celular moduladas por el clima ponen de manifiesto el gran reto que representan estas especies ante las temperaturas exacerbadas y la limitada disponibilidad de agua.

2. Introducción

La rápida configuración que el clima está ejerciendo sobre la biogeografía de los ecosistemas forestales ^[1,2] pone de manifiesto la necesidad de refinar el entendimiento de los cambios intraespecíficos ^[3]. El aumento de la temperatura y los episodios recurrentes de sequías están afectando los mecanismos ecológicos que enfrentan los árboles, resultando en declinación, tasas de mortalidad y pérdida de productividad ^[4].

En México, los bosques mixtos de la sierra madre occidental brindan múltiples funciones ecológicas y servicios inherentes a su complejidad ^[5,6,7]; no obstante, están sometidos a cambios exacerbados del clima ^[8] y aun es incierto si las crecientes temperaturas asociadas con otras variables climáticas producen una extensión de la temporada de crecimiento o la están limitando. Por ende, estos sitios resultan ideales para entender sus mecanismos de respuesta a las interacciones con el ambiente.

Una estrategia para entender su dinámica es el análisis de formación de madera, para anticiparse a los cambios futuros y buscar alternativas de manejo adaptativo; sobre todo, cuando las variaciones actuales del clima se presentan en escalas cada vez más cortas y contrastantes. Por ejemplo, los umbrales de temperatura pueden cambiar drásticamente en el lapso de unos días. Por ello, la

resolución temporal basada en muestreos quincenales refina notablemente la dinámica del crecimiento y su relación con el microclima, en una región donde la comunidad indígena coexiste con sus recursos naturales. De hecho, estos bosques han cambiado su configuración de Pino-encino a Pino-Juniperus por el uso antropogénico que se hace de los robles para leña y usos domésticos ^[9]. Aunque se ha demostrado que las temperaturas y la sequía están siendo los controladores de su crecimiento y modulan su productividad de estas dos especies ^[10,11,12], a nuestro conocimiento aún no se han documentado su dinámica de crecimiento celular y la formación de madera con las interacciones del clima.

Consecuentemente, aquí nos propusimos comparar la formación celular quincenal de dos especies de coníferas en un bosque mixto, correlacionado con variables climáticas, con el propósito de entender su respuesta ante variaciones ambientales. Específicamente respondimos las siguientes preguntas: ¿Cómo es la variación quincenal de la formación de madera? y ¿Cuáles son las variables climáticas que regulan la formación de madera?

Hipotetizamos que la formación de madera en las especies fue diferencialmente relacionada con el clima, siendo las temperaturas a corto plazo y la precipitación a largo plazo las que modulan la dinámica de su xylogenesis, lo cual tiene gran repercusión en regiones propensas a la sequía.

3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio

Elegimos arbitrariamente un polígono cuadrado de una hectárea, la cual correspondió a un bosque de pino-juniperus, que originalmente correspondía al tipo de bosque-encino, según González-Elizondo ^[7]. De acuerdo con el IVIF (ver sup1), la familia *Pinaceae* resultó con 1,105 individuos y presentó un valor mayor de abundancia, dominancia y frecuencia. Seguido de la familia *Cupresaceae* con 758 individuos. La familia *Fagaceae* obtuvo el tercer lugar con 243 y por último, *Ericaceae* con 59 individuos. Estas características concuerdan con la composición de otros bosques templados ^[13].

El sitio se localiza en la región de la Sierra Madre Occidental (27.1298511°, -107.116485°, 2400 msnm). La región es de suma importancia para las comunidades indígenas que habitan en sus alrededores, ya que les provee servicios ambientales, ecosistémicos y de subsistencia. Asimismo, esta área contribuye con el 25% de la producción forestal maderable de México ^[14,15].

La región cuenta con una variada vegetación que incluye bosques de pino-encino con presencia de algunas latifoliadas. Dentro de las especies presentan predominan *Pinus engelmannii* Carr., *P. arizonica* Engelm., *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *Juniperus deppeana* Steud, *Quercus arizonica* Sarg., *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl., *Q. durifolia* Seemen ex Loes, *Arbutus arizonica* (A. Gray) Sarg., y *A. bicolor* S. González, M. González & PD Sørensen ^[7].

El clima predominante es de tipo semifrío y semihúmedo, caracterizado por veranos largos y fríos, así como por lluvias monzónicas acompañadas de precipitaciones invernales. El promedio anual de precipitación es de 779 mm, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 5 y 12 °C ^[15].

3.2. Obtención de muestras

El muestreo se llevó a cabo desde octubre de 2022 hasta octubre de 2023 para las especies *P. engelmannii* y *J. deppeana*. Se eligieron árboles que destacaban por su dominancia, aparente salud y buena forma, con copas simétricas, excluyendo aquellos con cicatrices, tallos dañados u otras lesiones visibles. En cuanto a *Juniperus deppeana*, estos árboles mostraron un diámetro promedio de 11.5 cm y una altura de 5.31 m. Por otro lado, en el caso de *Pinus engelmannii*, se registró un diámetro promedio de 22.43 cm y una altura de 11.33 m. Se empleó un sacabocados de 4 mm de grosor para obtener micronúcleos quincenales de tres individuos de cada especie. Este proceso se realizó siguiendo una trayectoria en espiral y a una altura de 0.5 m desde la base del tronco. Las muestras se almacenaron en tubetes de plástico etiquetados con el número de árbol y de muestreo, sumergidos en una solución de alcohol al 70%.

3.3. Procesamiento de muestras y conteo de células

El procedimiento para la obtención de cortes anatómicos se realizó en el Laboratorio de Anatomía y Tecnología de la Madera de la División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Se llevó a cabo un registro inicial de los individuos para verificar la cantidad de muestras disponible. Luego, cada una de las muestras fue orientada en el plano transversal, con las fibras y traqueidas dispuestas en sentido vertical. Se marcó la cara superior de cada muestra utilizando un lápiz de tinta para facilitar su identificación. Luego, los micronúcleos se impregnaron al vacío con Poly(ethylene glycol) dentro de un desecador. Se aplicaron ciclos de vacío de 5 y 7 minutos cada 40 minutos hasta que las muestras se saturaron por completo. Este procedimiento se llevó a cabo con el objetivo de estabilizar el tejido y facilitar los cortes anatómicos. Una vez impregnadas por completo, las muestras se retiraron y se montaron sobre bases de madera utilizando pegamento KolaLoka® para garantizar su manipulación y conservar la orientación en el plano transversal del micronúcleo. Posteriormente, se dejaron reposar durante 24 horas. Luego, se obtuvieron cortes anatómicos de 25, 20 y 18 micras de grosor utilizando un microtomo de deslizamiento Leica SM 2000 R® (Leica Microsystems, Wetzlar, Alemania). Estas muestras fueron teñidas durante cinco minutos con un colorante a base de Safranin O y Astra blue 6GLL. Seguidamente, cada muestra se colocó en un portaobjetos, se eliminó el exceso de humedad con toallas de papel y se fijaron con resina Entellan®.

Las muestras fueron analizadas utilizando un microscopio Leica DM 500®. Se llevó a cabo el conteo de las fases de desarrollo celular en cinco hileras radiales para cada muestra, lo que implicó la identificación del número de células de cambium, traqueidas alargadas radialmente, traqueidas engrosadas en la pared y número de traqueidas maduras de madera temprana y tardía ^[16]. El conteo se realizó directamente mediante el microscopio, observando las células de cambium, alargamiento y engrosamiento a 40x de aumento, mientras que las células maduras se observaron a 10x.

Finalmente se realizaron correlaciones de Spearman con diferentes variables climáticas: Temperatura máxima, Temperatura mínima, Precipitación e Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (Figura Sup. 1).

4. Resultados y Discusión

Los resultados revelaron la dinámica de crecimiento y formación de madera de las especies estudiadas (Figura 1). En cuanto a las células del cambium, *P. engelmannii* presentó un comportamiento trimodal mostrando picos de crecimiento a mediados de febrero (DOY = 46, 2023), finales de mayo (DOY = 150, 2023) y a mediados de septiembre (DOY = 258, 2023). En contraste, *J. deppeana* presentó valores relativamente variables a lo largo del año de muestreo, con su valor máximo registrado a finales de noviembre (DOY = 279, 2023). Para ambas especies se observó una disminución drástica de crecimiento a mediados de abril (DOY 105, 2023).

En cuanto a las células que se agrandan radialmente, se observaron valores que oscilaron entre 0 y 3 células. *P. engelmannii* alcanzó su valor máximo a finales de agosto (DOY = 243, 2023), mientras que *J. deppeana* registró su valor máximo a mediados de septiembre (DOY = 258, 2023).

Para las células con paredes engrosadas, los valores para ambas especies oscilaron entre 0 y 4 células. Se observó que ambas especies presentaron valores elevados desde mediados de octubre (DOY = 287, 2022) hasta inicios de diciembre (DOY = 336, 2022), y nuevamente desde finales de agosto (DOY = 243, 2023) hasta mediados de octubre (DOY = 288, 2023). Además, *P. engelmannii* mostró un pico de crecimiento a inicios de enero (DOY = 3, 2023).

En cuanto a las células maduras de madera tardía, *P. engelmannii* presentó un número mayor de células en comparación con *J. deppeana*. Para *P. engelmannii*, se observó un período de producción de células de madera tardía desde mediados de noviembre (DOY = 323, 2022) hasta finales de abril (DOY = 120, 2023). Por otro lado, *J. deppeana* inició la producción de células de madera tardía a finales de octubre (DOY = 307, 2022) y la continuó hasta finales de mayo (DOY = 150, 2023).

Finalmente para las células de madera temprana, se observó que *J. deppeana* presentó un número mayor de células en comparación con *P. engelmannii*. *P. engelmannii* mostró valores que oscilaron entre 12 y 26 células desde mediados de octubre (DOY = 287, 2022) hasta finales de abril (DOY = 120, 2023), alcanzando su valor máximo a finales de enero (DOY = 30, 2023). Posteriormente, se observó una disminución en el período de mediados de mayo (DOY = 135, 2023) hasta mediados de junio (DOY = 165, 2023), seguida de un crecimiento gradual a partir de inicios de julio (DOY = 182, 2023) hasta el final del muestreo. *J. deppeana* presentó una tendencia similar, con valores que oscilaron entre 24 y 56 células de madera temprana desde mediados de octubre (DOY = 287, 2022) hasta finales de abril (DOY = 120, 2023), alcanzando su valor máximo a mediados de abril (DOY = 105, 2023). Asimismo, se observó un crecimiento gradual a partir de finales de julio (DOY = 211, 2023) hasta el final del muestreo.

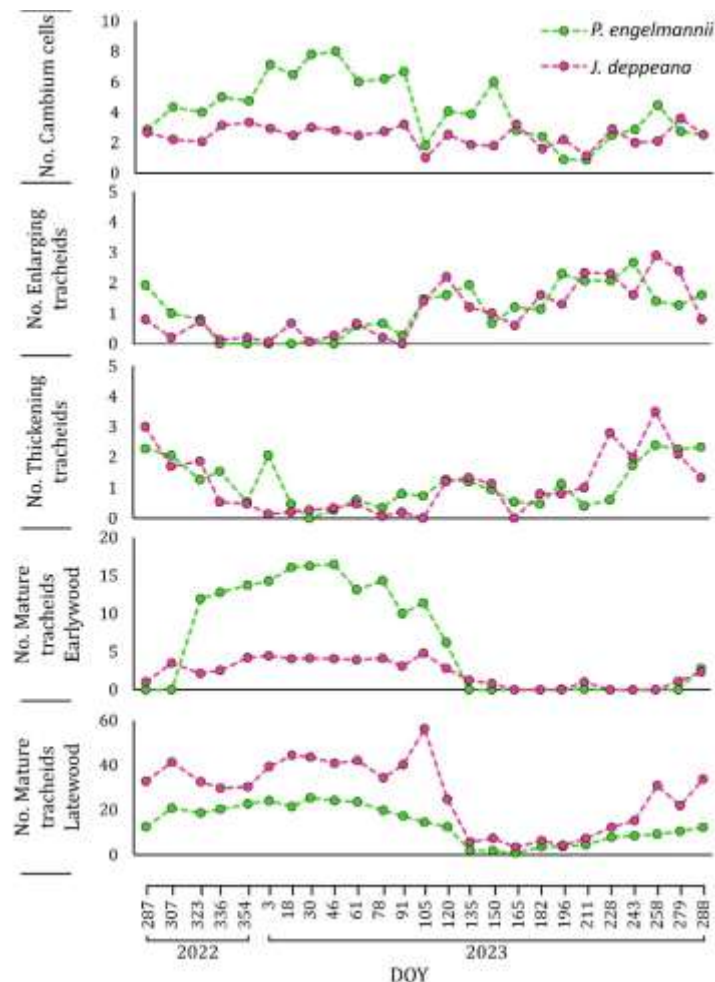


Figura 1. Fases de xylogenesis para las especies de coníferas.

Los resultados de las correlaciones de Spearman para variables climáticas presentaron los siguientes resultados (Figura 2).

La temperatura máxima y mínima ejercen un efecto desfavorable en el desarrollo de las células del cambium ($\rho = 0.78$ y 0.80 respectivamente) y de las traqueidas maduras de madera temprana y madera tardía en *P. engelmannii* ($\rho = -0.79$ – -0.89), pero estimulan el crecimiento de traqueidas alargadas radialmente ($\rho = 0.78$ – 0.81). Así mismo, en *J. deppeana*, tienen un impacto positivo en el desarrollo de traqueidas alargadas radialmente ($\rho = 0.81$), mientras que influyen negativamente en el desarrollo tanto de traqueidas maduras de madera temprana como de madera tardía ($\rho = -0.66$ – -0.84). La precipitación influye de manera positiva en el desarrollo de células alargadas únicamente en *P. engelmannii* ($\rho = 0.52$). Finalmente, el índice SPEI no presentó ninguna correlación significativa con ningún tipo de células.

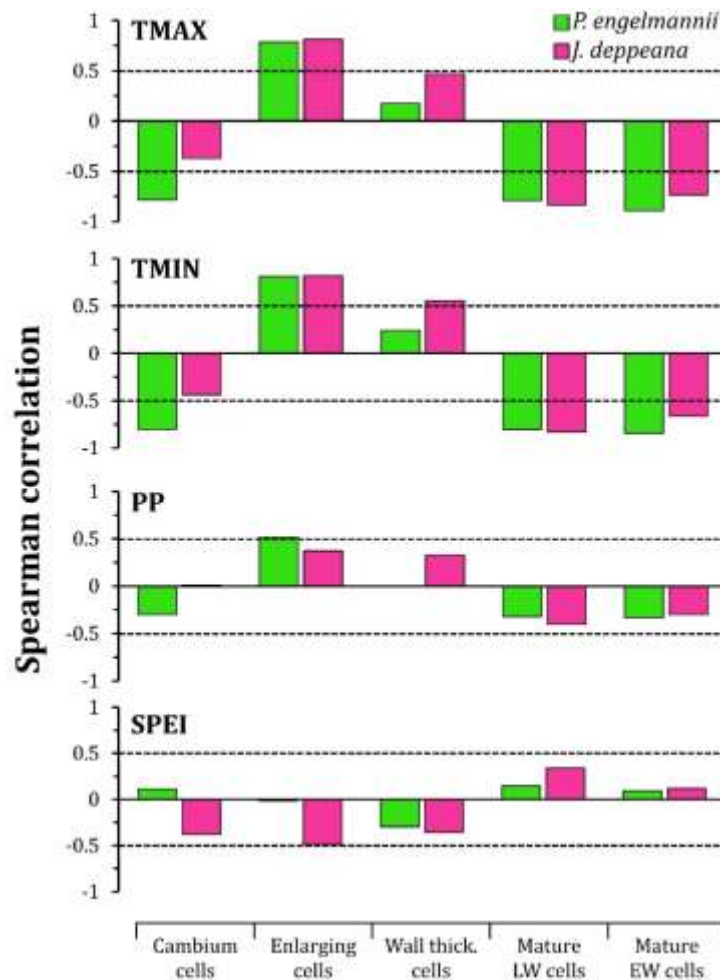


Figura 2. Relaciones clima-xylogenesis para las especies estudiadas. La línea discontinua indica los niveles de significancia de 0.05.

P. engelmannii se diferenci3 en su actividad cambial de *J. deppeana* al presentar tres picos de activaci3n cambial atribuibles a las condiciones t3rmicas del 3rea (Figura 2). Las altas temperaturas al final del invierno (febrero), durante la 3poca seca (mayo) y las condiciones pre-mons3nicas (septiembre) revelan que la temperatura m3xima es un activador de la actividad cambial, que en el caso de las especies aqu3 abordadas muestran ligeras discrepancias atribuibles a sus necesidades fisiol3gicas diferenciadas, pero muestran en com3n su sensibilidad t3rmica. Nuestros resultados guardan coherencia con las tasas de crecimiento celular en especies de bosques mixtos ^[17]. En el caso de *J. deppeana*, la tendencia resulta con menos oscilaciones, pero coincidente en ciertos periodos (Figura 1), cuyas causas parecen estar relacionadas menormente con la Tmax (Figura 2). Ello contrasta con Ren et al. ^[18], donde 3rboles maduros de enebro Qilian (*Juniperus przewalskii*) se encontr3 que la sequ3a puede causar un retraso al inicio de la xilog3nesis en primavera y conduce a un cese temprano de la diferenciaci3n del xilema en verano. No obstante, hay que hacer notar que nuestros 3rboles son juveniles (< a 30 a3os).

El alargamiento de traqueidas ocurrió de manera similar para las dos especies, como consecuencia del agua disponible, aun en el periodo de estrés por sequía, lo que indica que estas especies disponen de agua, quizá almacenada en la albura o en raíces ^[19], lo que resulta concordante con la menor correlación con la precipitación (Figura 2). Se ha comprobado que una reactivación del crecimiento de células después de una rehidratación tarda de dos a cuatro semanas en ambientes controlados, por lo que en esta área propensa a la sequía puede ser de mayor retraso ^[1]. De hecho, el tamaño de las células a lo largo del anillo del árbol está estrechamente relacionado con la dinámica temporal de la formación de células ^[20].

El engrosamiento de paredes celular ocurrió mayormente en el verano tardío, extendiéndose al otoño para ambas especies (Figura 1), aunque no se detecta influencia climática (Figura 2); De acuerdo a Körner and Basler ^[21], no solo el agua juega un papel crucial en xylogenesis, también lo hacen el fotoperiodo, la duración de heladas, y los factores genéticos.

Respecto a la maduración de EW y LW, *P. engelmannii* sobresale con EW, mientras que *J. deppeana* lo hace con LW, lo que se asocia negativamente a TMAX. Sobre todo la temperatura es crítica al inicio de la estación de crecimiento en coníferas siempre verdes ^[22,23]. Además la temperatura viene regulando el inicio y el final de la xylogenesis ^[24], lo que recobra relevancia ante el calentamiento global, por lo que es posible que esta variable tenga repercusión en modificar esta temporalidad sobre todo en regiones donde la sequía ocurre regularmente.

El SPEI no tuvo implicaciones en la dinámica de xylogenesis. Al parecer las condiciones atmosféricas, i.e. humedad relativa del aire y el deficit de vapor no afectaron el crecimiento radial de las dos especies ^[3]. En Ziaco et al. ^[25] se encontró que las condiciones de humedad del mes anterior, como el contenido de agua del suelo y el punto de rocío, fueron factores clave de la fenología cambial en estos árboles, enfatizando la importancia de la humedad estacional para *Pinus ponderosa* en el desierto de Mojave.

4.1. Algunas limitaciones

Debido al coste de dicho seguimiento, las investigaciones sobre la xylogenesis generalmente duran 1 o 2 años, y básicamente faltan cronologías a largo plazo de la fenología del xilema, lo que impide una comprensión más completa de este proceso de crecimiento y los impulsores ambientales relacionados. Además, los factores climáticos generalmente están intrínsecamente vinculados, lo que dificulta separar completamente sus efectos ^[26]. Así, los estudios sobre la fenología del xilema de las plantas en condiciones de crecimiento naturales y controladas son necesarias para separar los factores dominantes que impulsan la xylogenesis de múltiples factores climáticos y particularmente para llenar el vacío entre la disponibilidad de humedad y el inicio de entrenamiento del xilema. Así mismo, el número de muestras aún puede incrementarse para dilucidar mejores resultados. De acuerdo a estudios previos, se usan al menos cinco árboles (ver ^[18,27]).

5. Conclusiones

Este trabajo pionero de especies coexistentes en un bosque mixto mexicano elucidó que la formación de madera y su dinámica está relacionada con las variaciones termoclimáticas. Las tendencias

sincronizas de xylogenesis fueron similares para las dos especies, pero diferenciadas en su magnitud. Las condiciones térmicas a corto plazo y la precipitación a largo plazo modularon la dinámica su formación de madera, lo cual tiene gran repercusión ante los escenarios de sequía pronosticado para estas regiones.

Agradecimientos

Se agradece al laboratorio de anatomía de la madera de la DICIFO, en Chapingo por su apoyo en el procesamiento de las muestras. Así mismo, al equipo de <https://dendroed.ujed.mx/> por el esfuerzo en coleccionar muestras y revisiones previas del manuscrito.

6. Bibliografía

1. Liang E., Balducci L., Ren P., Rossi S. “Xylogenesis and Moisture Stress”, Chapter 3, Secondary Xylem Biology, Origins, Functions, and Applications. Academic Press, 2016.
2. Camarero J. J., Olano J. M., Parras A., Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates, New Phytol. V. 185, 471–480 (2010).
3. Oberhuber W., Gruber A., Kofler W., Swidrak I., Radial stem growth in response to microclimate and soil moisture in a drought-prone mixed coniferous forest at an inner Alpine site, Eur. J. Forest Res. V. 133, 467–479 (2014).
4. Socha J., Hawryło P., Tymińska-Czabańska L., Reineking B., Lindner M., Netzel P., Grabska-Szwagrzyk E., Vallejos R., Reyer C. P. O., Higher site productivity and stand age enhance forest susceptibility to drought-induced mortality, Agric. For. Meteorol. V. 341, 109680 (2023).
5. Arasa-Gisbert R., Vayreda J., Román-Cuesta R. M., Villela S. A., Mayorga R., Retana J., Forest diversity plays a key role in determining the stand carbon stocks of Mexican forests, For. Ecol. Manag. V. 415–416, 160–171 (2018).
6. Bauhus J., Forrester D. I., Gardiner B., Jactel H., Vallejo R., Pretzsch H., “Ecological Stability of Mixed-Species Forests”, Chapter 7, Mixed-Species Forests. Springer, 2017.
7. González-Elizondo M. S., González-Elizondo M., Tena-Flores J. A., Ruacho-González L., López-Enríquez I. L., Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis, Act. Bot. Mex. V. 100, 351–403 (2012).
8. Pompa-García M., Camarero J. J., Rodríguez-Trejo D. A., Vega-Nieva D. J., Drought and Spatiotemporal Variability of Forest Fires Across Mexico, Chin. Geogr. Sci. V. 28, 25–37 (2018).
9. LaRochelle S., Berkes F., Traditional Ecological Knowledge and Practice for Edible Wild Plants: Biodiversity Use by the Rarámuri, in the Sierra Tarahumara, Mexico, Int. J. Sustain. Dev. World Ecol. V. 10, 361–375 (2009).
10. González-Cásares M., Pompa-García M., Camarero J. J., Differences in climate–growth relationship indicate diverse drought tolerances among five pine species coexisting in Northwestern Mexico, Trees V. 31, 531–544 (2017).
11. Pompa-García M., González-Cásares M., Acosta-Hernández A.C., Camarero J. J., Rodríguez-Catón M., Drought Influence over Radial Growth of Mexican Conifers Inhabiting Mesic and Xeric Sites, Forests V. 8, 175 (2017).
12. Cerano-Paredes J., Molina-Pérez I., Esquivel-Arriaga G., Cervantes-Martínez R., Villanueva-Díaz J., Franco-Ramos O., Méndez-González J., Cambrón-Sandoval V. H., Cardoza-Martínez G. F., “Dendroecological Potential of *Juniperus deppeana* in Northern Mexico”, Chapter 9, Latin American Dendroecology. Springer Cham, 2020.
13. Hernández-Salas J., Aguirre-Calderón O. A., Alanís-Rodríguez E., Jiménez-Pérez J., Treviño-Garza E. J., González-Tagle M. A., Luján-Álvarez C., Olivas-García J. M., Domínguez-Pereda L. A., Dinámica del crecimiento de un bosque templado bajo manejo en el noroeste de México, Madera Bosques V. 24, e2421767 (2018).

14. Fulé P. Z., Ramos-Gómez M., Cortés-Montaña C., Miller A. M., Fire regime in a Mexican forest under indigenous resource management, *Ecol. Appl.* V. 21, 764–775 (2011).
15. Vivar-Vivar E. D., Pompa-García M., Martínez-Rivas J. A., Mora-Tembre L. A., UAV-Based Characterization of Tree-Attributes and Multispectral Indices in an Uneven-Aged Mixed Conifer-Broadleaf Forest, *Remote Sens.* V. 14, 2775 (2022).
16. Antonova G. F., Stasova V. V., Effects of environmental factors on wood formation in Scots pine stems, *Trees* V. 7, 214–219 (1993).
17. Cuny H. E., Rathgeber C. B. K., Lebourgeois F., Fortin M., Fournier M., Life strategies in intra-annual dynamics of wood formation: example of three conifer species in a temperate forest in north-east France, *Tree Physiol.* V. 32, 612–625 (2012).
18. Ren P., Rossi S., Gricar J., Liang E., Cufar K., Is precipitation a trigger for the onset of xylogenesis in *Juniperus przewalskii* on the north-eastern Tibetan Plateau?, *Ann. Bot.* V. 115, 629–639 (2015).
19. Grip H., “Water Cycling in Coniferous Forest Ecosystems”, Chapter 10, *Ecosystem of the world: Coniferous Forests*. Elsevier, 2005.
20. Buttò V., Rossi S., Deslauriers A., Morin H., Is size an issue of time? Relationship between the duration of xylem development and cell traits, *Ann. Bot.* V. 123, 1257–1265 (2019).
21. Körner C., Basler D., Response—Warming, Photoperiods, and Tree Phenology, *Science* V. 329, 278 (2010).
22. Rossi S., Deslauriers A., Gricar J., Seo J.-W., Rathgeber C. B. K., Anfodillo T., Morin H., Levanic T., Oven P., Jalkanen R., Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates, *Glob. Ecol. Biogeogr.* V. 17, 696–707 (2008).
23. Begum S., Nakaba S., Yamagishi Y., Oribe Y., Funada R., Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: understanding the role of temperature in wood formation of trees, *Physiol. Plant.* V. 147, 46–54 (2013).
24. Neverov N. A., Chistova Z. B., Mineev A. L., Radial Growth of Scots Pine in the Northern Taiga, *Izvestiâ Vysših Učebnyh Zavedenij. Lesnoj Žurnal*, V. 6, 193–205 (2022).
25. Ziaco E., Truettner C., Biondi F., Bullock S., Moisture-driven xylogenesis in *Pinus ponderosa* from a Mojave Desert mountain reveals high phenological plasticity, *Plant Cell Environ.* V. 41, 823–836 (2018).
26. Wolkovich E. M., Cook B. I., Davies T. J., Progress towards an interdisciplinary science of plant phenology: building predictions across space, time and species diversity, *New Phytol.* V. 201, 1156–1162 (2014).
27. Carteni F., Deslauriers A., Rossi S., Morin H., De Micco V., Mazzoleni S., Giannino F., The Physiological Mechanisms Behind the Earlywood-To-Latewood Transition: A Process-Based Modeling Approach, *Front. Plant. Sci.* V. 9, 1053 (2018).

Material suplementario 1. Cálculo de IVI

Índice de Valor
de Importancia

$$IVI_i = AR_i + DR_i + FR_i$$

AR_i =abundancia relativa de la especie i respecto a la abundancia total, DR_i =área de copa relativa de la especie i respecto al área de copa total, FR_i =frecuencia relativa de la especie i respecto a la suma de las frecuencias

Tabla Sup. 1. Familia, Genero y Taxones presentes.

Familia	Género	Especie	n
Pinacea	Pinus (1105)	<i>P. cooperi</i>	2
		<i>P. engelmannii</i>	1099
		<i>P. leiophylla</i>	4
Cupresaceae	Juniperus (758)	<i>J. deppeana</i>	758
Fagaceae	Quercus (243)	<i>Q. arizonica</i>	26
		<i>Q. crassifolia</i>	30
		<i>Q. durifolia</i>	187
Ericaceae	Arbutus (59)	<i>A. arizonica</i>	52
		<i>A. bicolor</i>	7

De acuerdo con el IVI, la familia *Pinaceae* con 1,105 individuos presentó un valor mayor de abundancia, dominancia y frecuencia, seguido de la familia *Cupresaceae* con 758 individuos. La familia *Fagaceae* obtuvo el tercer lugar con 243 y por último, *Ericaceae* con 59 individuos.

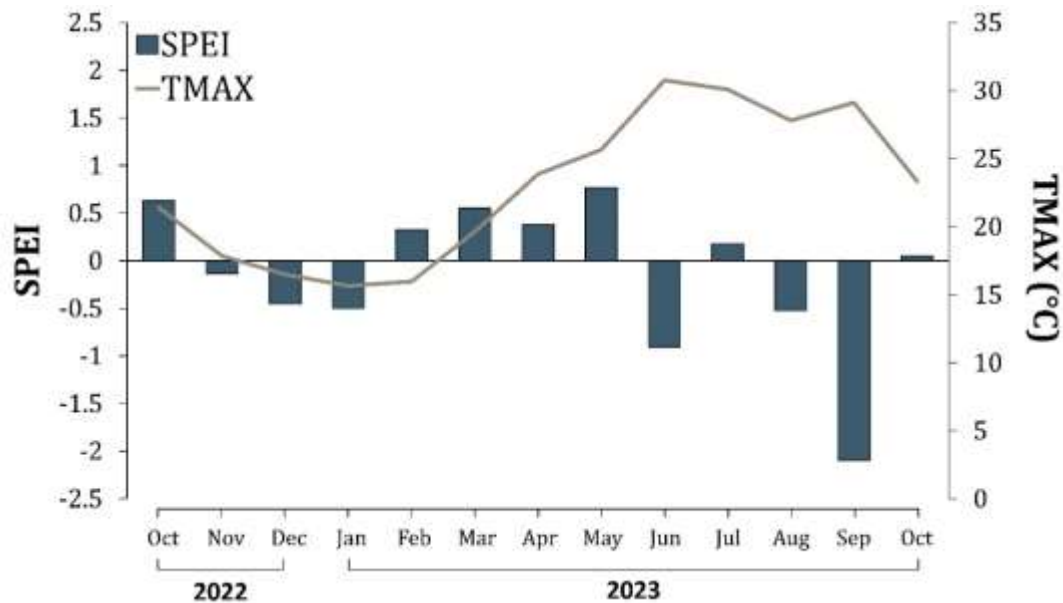


Fig. Sup. 1. Valores de Temperatura máxima (TMAX, línea continua) e Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI, barras).

Propiedades físicas de la madera de *Acacia pennatula* y *Trema micrantha*.

Apolinar, HF¹ y Honorato, SJA¹

¹ Campo Experimental San Martinito-INIFAP

apolinar.flora@inifap.gob.mx

honorato.amador@inifap.gob.mx

1. Resumen

Acacia pennatula (Schltdl. & Cham.) Benth. y *Trema micrantha* (L.) Blume son especies forestales sobre las cuales hay poca información acerca de las características físicas de su madera. Por ello, el objetivo de este trabajo fue determinar las contracciones parciales y totales, así como la densidad básica de la madera de estas dos especies, utilizando cubos de madera de 2 cm de lado obtenidos de 3 árboles por especie. Los resultados mostraron que *A. pennatula* presentó una densidad básica de 0.56 g/cm³, con una contracción volumétrica de 13.24% y contracciones totales de 7.50%, 5.51% y 0.74% en las direcciones tangencial, radial y longitudinal, respectivamente. Por su parte, la densidad básica de *T. micrantha* fue de 0.34 g/cm³, con contracciones totales tangenciales de 6.06%, radiales de 3.59%, longitudinales de 0.97% y volumétricas de 10.32%. La relación de anisotropía fue de 1.36 para *A. pennatula* y de 1.69 para *T. micrantha*.

2. Introducción

La madera de *Acacia pennatula* y *Trema micrantha* se utiliza comúnmente en las zonas rurales de México para construcciones rústicas y como leña. A pesar de sus usos y su potencial para diversas aplicaciones, estas especies están subutilizadas.

A. pennatula se distribuye en los estados de Aguascalientes, Campeche, Chihuahua, Colima, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Veracruz, Yucatán y Zacatecas. A lo largo de su distribución, recibe una variedad de nombres locales como huisle negro, tepame, huizache, tepano, algarrobo y espino. Los árboles se encuentran a altitudes de 400 a 2500 msnm y en diferentes tipos de vegetación: bosque tropical caducifolio, bosque de encinos y matorral xerófilo. ^[1] Puede alcanzar hasta 14 metros de altura, es una especie de rápido crecimiento y se encuentra en zonas perturbadas. Se adapta a suelos someros, calizos, arenosos, pedregosos y bien drenados. Además, tolera heladas y sequías, lo que permite una rápida repoblación de áreas degradadas. Es una madera dura y pesada, útil para ensambles, ebanistería, alfardas, vigas, horcones, mangos para herramientas, postes para cercas, leña y carbón. También se utiliza como barrera rompevientos, alimento para ganado y árboles de sombra. ^[2]

Trema micrantha se encuentra desde el sur de Florida hasta el norte de Argentina, en México, está presente en la vertiente del Golfo, desde el sur de Tamaulipas hasta Yucatán y Quintana Roo y en la vertiente del Pacífico, desde Sonora y Sinaloa hasta Chiapas. Se localiza a altitudes de 0 a 1,500 msnm ^[1] y puede alcanzar hasta 30 metros de altura. Habita en selvas bajas, selvas medianas, bosques mesófilos de montaña y planicies costeras. Comúnmente se le conoce con diferentes nombres según la región: ishpepe, jonote, capulín, chaka cueruda, puam y jucó ^[3]. Es una especie de rápido crecimiento con potencial para la reforestación en tierras pobres, potreros abandonados, áreas erosionadas y muy alteradas. ^[4] La madera es liviana y se utiliza en construcciones ligeras, vigas, tablas, leña, como árbol de sombra para el café ^{[1][3]} y su corteza se emplea en la elaboración del papel amate en la sierra de Puebla ^[5].

La madera cambia de dimensiones en sus direcciones tangencial, radial y longitudinal en proporción a la ganancia o pérdida de humedad y el valor de los cambios se expresa en porcentaje de su dimensión original. Si la madera gana humedad, aumenta sus dimensiones, lo que se denomina expansión o hinchamiento; si pierde humedad, disminuyen sus dimensiones, lo que se llama contracción. Esto indica la estabilidad dimensional que la madera puede tener en uso ^[6]. El valor de las contracciones permite calcular los refuerzos necesarios en las piezas de madera en la industria del aserrío, en el secado y en la fabricación de muebles.

Asimismo, la densidad es una de las propiedades físicas más importantes de la madera, ya que está estrechamente relacionada con su comportamiento físico-mecánico. Se utiliza tanto en la industria maderera como en la de pulpa y papel, porque es un buen indicador de calidad. ^[7]

En las referencias de las propiedades de la madera de *A. pennatula*, se han reportado valores de densidad de 0.78 g/cm³ y contracciones de 11.25% y 4.69% de la parte tangencial y radial respectivamente ^[8] y en lo que respecta a *T. micrantha* valores de densidad de 0.46 g/cm³ ^[9] y 0.42 g/cm³ ^[10]. La calidad de una madera está determinada por sus características tecnológicas por lo cual el objetivo de este trabajo fue determinar la densidad básica y las contracciones parciales y totales de la madera de *T. micrantha* y *A. pennatula*.

3. Condiciones experimentales

Se colectaron muestras de madera de tres árboles de *Trema micrantha* y *Acacia pennatula* en los municipios de Zongolica y Naranjal del estado de Veracruz. De cada árbol, se cortaron dos rodajas de 2 cm de grosor: una en la base de la rama y otra en la punta. Cada rodaja se dividió en cuadrantes (A, B, C y D), de donde se obtuvieron cubos de 2 cm de lado que se colocaron en agua, aplicando vacío hasta que se saturaron completamente. A los cubos saturados se les determinó su volumen, su peso y sus dimensiones iniciales. Primero, se midió el volumen por inmersión: se colocó un vaso de precipitado con agua en una balanza analítica, se taró la balanza y con una aguja de disección, se introdujo la madera hasta sumergirla completamente; el peso de la muestra sumergida se consideró igual al volumen de la muestra. Posteriormente, para las mediciones de las contracciones, a los cubos se les marcaron las direcciones tangencial, radial y longitudinal para tomar las lecturas en el mismo punto con un vernier digital. Se pesaron para obtener el peso inicial y se midieron sus dimensiones en estado húmedo. Se monitoreó la pérdida de humedad y el cambio de dimensiones de las probetas cada 24 horas durante 8 días a temperatura ambiente. Después, los cubos se secaron en horno a una temperatura de 105 °C durante tres periodos de 15 minutos, dos de 30 minutos, dos de 1 hora, uno de 2 horas y uno de 2 días. Al finalizar cada periodo de secado, los cubos se pesaron y midieron.

Con las siguientes ecuaciones se calculó el contenido de humedad (1), la densidad básica (2), las contracciones lineales (3) y volumétricas (4), el modelo de ajuste de los valores de contracción (5) y la relación de anisotropía (6) ^[11]

$$CH (\%) = \frac{P_i - P_o}{P_o} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad

Pi = Peso saturado, húmedo o inicial (g)

Po = Peso anhidrido (Peso seco en la estufa a 103± 2 °C) (g)

$$Db (gr/cm^3) = \frac{P_o}{V_v} \quad (2)$$

Donde:

Vv = Volumen verde

Po = peso anhidrido

$$\text{Contracción lineal [CT, CR, CL] (\%)} = \frac{\text{Dimensión inicial} - \text{Dimensión final}}{\text{Dimensión inicial}} * 100 \quad (3)$$

$$CV = 100[1 - (1 - 0.01CT)(1 - 0.01CR)(1 - 0.01CL)] \quad (4)$$

Donde:

CT = Contracción tangencial

CR = Contracción radial

CL = Contracción longitudinal

CV = Contracción volumétrica

$$C = b_0 * EXP(-b_1 * CH) \quad (5)$$

b1 y b2 = estimadores del modelo

C = Contracción lineal o volumétrica (%)

b0 representa la contracción total y b1 indica el cambio exponencial por cada 1% de cambio en el contenido de humedad.

$$A = \frac{CT}{CR} \quad (6)$$

A los datos se les realizó un análisis de varianza y una comparación múltiple de medias con el procedimiento de Tukey ($\alpha=0.05$), usando el programa SAS.

4. Resultados y discusión

Se observaron diferencias significativas entre la madera de las dos especies ($\alpha=0.05$), como se muestra en la Tabla 1. Para *Acacia pennatula* se encontró una densidad básica de 0.56 g/cm³, la cual se clasifica como densidad media.^[12] Sin embargo, para la misma especie, se ha reportado un valor medio de 0.78 g/cm³ [8], mayor al encontrado en este estudio, considerándose la madera como excesivamente pesada. Además, se han reportado valores de densidad para otras especies del mismo género: 0.89 g/cm³ para *Acacia aroma*, 0.96 g/cm³ para *A. caven*, 0.99 g/cm³, para *A. furcatispina* y 0.91 g/cm³ *A. praecox*,^[13] los cuales son más altos que los encontrados en este estudio.

Respecto a la madera de *Trema micrantha* se encontró una densidad baja de 0.34 g/cm³, que es menor a los reportados por otros autores con valores de 0.44 g/cm³ [9] y 0.42 g/cm³ [13].

TABLA 1. DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA DE ACACIA PENNATULA Y TREMA MICRANTHA

Especie	Densidad Básica g/cm ³ *	Clasificación (Torelli,1982)
<i>Acacia pennatula</i>	0.56 A	Media
<i>Trema micrantha</i>	0.34 B	Baja

*Valores con la misma letra no son significativamente diferente ($p \leq 0.05$)

Los valores de las contracciones lineales parciales y totales de la madera presentaron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) entre las especies tanto en las direcciones radial, tangencial y longitudinal como en la volumétrica (Tabla 2).

La madera de *Acacia pennatula* mostró un valor de contracción total tangencial de 7.50%, radial de 5.51%, longitudinal de 0.74% y volumétrica de 13.24%. Según la clasificación, esto indica una contracción alta en la dirección tangencial y muy alta en la radial. ^[14] Al comparar estos datos con los reportados en otro estudio para la misma especie, se observó una mayor contracción en el plano tangencial (11.25%) y una menor en el radial (4.69%). De manera similar, para *Acacia conchliacantha* se obtuvieron valores de contracción total tangencial de 9.67% y radial de 4.45% ^[8].

Por otro lado, la madera de *Trema micrantha* presentó una contracción total tangencial de 6.06%, radial de 3.59%, longitudinal de 0.97% y volumétrica de 10.32%, clasificándose como de contracción media ^[14].

TABLA 2. CONTRACCIONES PARCIALES Y TOTALES DE LAS ESPECIES DE ACACIA PENNATULA Y TREMA MICRANTHA.

Especie	Contracciones parciales (%)					Contracciones totales (%)			
	CH %	T	R	L	V	T	R	L	V
<i>Acacia Pennatula</i>	12.95	4.01 A*	2.73 A	0.24 B	6.84 A	7.50 A	5.51 A	0.74 B	13.24 A
<i>Trema Micrantha</i>	12.64	3.85 B	2.10 B	0.61 A	6.44 B	6.06 B	3.59 B	0.97 A	10.32 B

*Valores con la misma letra no son significativamente diferente ($p \leq 0.05$); T: Tangencial, R: Radial, L: Longitudinal, V: Volumétrica.

Los datos experimentales se ajustan al modelo (5), representado en la Tabla 3, el cual muestra el comportamiento de un cambio exponencial de la contracción en función del contenido de humedad.

CUADRO 3. ESTIMADORES Y COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN DE LOS VALORES AJUSTADOS DE CONTRACCIÓN

<i>Acacia pennatula</i>				
Contracción	b0	b1	R2	Ecuación
Tangencial	7.577	0.049	0.988	CT = 7.577* EXP(-0.049*CH)

Radial	5.485	0.051	0.991	$CR = 5.485 \cdot \text{EXP}(-0.051 \cdot CH)$
Longitudinal	0.692	0.072	0.973	$CL = 0.692 \cdot \text{EXP}(-0.072 \cdot CH)$
Volumétrica	13.261	0.050	0.990	$CV = 13.261 \cdot \text{EXP}(-0.050 \cdot CH)$

<i>Trema micrantha</i>				
Contracción	b0	b1	R2	Ecuación
Tangencial	6.011	0.024	0.980	$CT = 6.011 \cdot \text{EXP}(-0.024 \cdot CH)$
Radial	3.503	0.025	0.963	$CT = 3.503 \cdot \text{EXP}(-0.025 \cdot CH)$
Longitudinal	0.848	0.016	0.937	$CT = 0.848 \cdot \text{EXP}(-0.016 \cdot CH)$
Volumétrica	10.060	0.023	0.974	$CT = 10.060 \cdot \text{EXP}(-0.023 \cdot CH)$

Al sustituir los datos en el modelo (5), se obtienen los valores ajustados correspondientes a las contracciones lineales y volumétricas con respecto al contenido de humedad de cada especie (Tabla 3), como se observa en las Figuras 1 y 2.

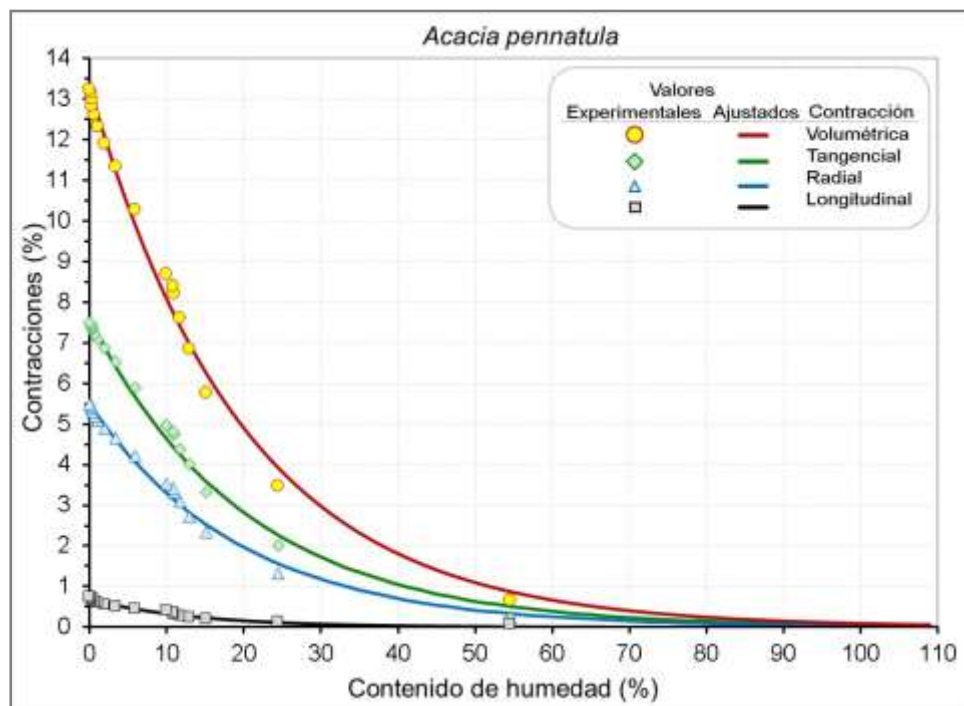


FIGURA 1. RELACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y LAS CONTRACCIONES DE ACACIA PENNATULA

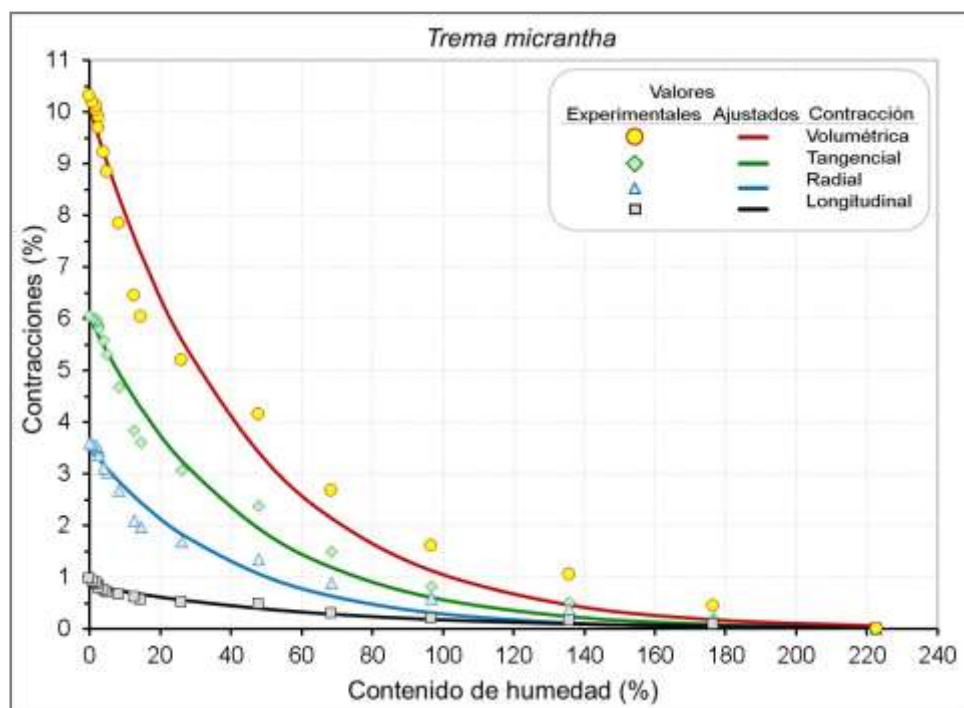


FIGURA 2. RELACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y LAS CONTRACCIONES DE TREMA MICRANTHA.

Los símbolos representan los valores experimentales, mientras que las líneas continuas muestran los valores ajustados para las diferentes contracciones. Esto permite estimar las contracciones desde la condición saturada hasta cualquier contenido de humedad. Por cada 1% de disminución en el contenido de humedad, la madera de *A. pennatula* se contrae 0.049% tangencialmente, 0.051% radialmente, 0.072% longitudinalmente y 0.050% en volumen. En comparación, las contracciones de *T. micrantha* son menores: tangencial 0.024%, radial 0.025, longitudinal 0.016% y volumétrica 0.023%.

La relación de anisotropía fue de 1.36 para *A. pennatula* y 1.69 para *T. micrantha*. De acuerdo con la clasificación, ^[15] la madera de *A. pennatula* es muy estable y la de *T. micrantha* es estable.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos de las propiedades físicas indican que existen diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre la madera de las especies de estudio. *Acacia pennatula* presentó una densidad media (0.56 g/cm^3) y *Trema micrantha* una densidad baja (0.34 g/cm^3). En cuanto a las contracciones, *A. pennatula* se contrae más (tangencial 7.49 %, radial 5.50%) que *T. micrantha* (tangencial 5.82%, radial 3.63%) y la anisotropía indica que la madera de las dos especies es estable en sus dimensiones.

6. Bibliografía

1. Gutiérrez C.L., y Dorantes L. J., 2004. Especies forestales de uso tradicional del estado de Veracruz (Potencialidades de especies con uso tradicional del estado de Veracruz, con opción para establecer plantaciones forestales comerciales). CONAFOR-CONACYT-UV. México, 210.
2. Pronatura Veracruz. Red de Viveros de Biodiversidad. https://revivemx.org/Fototeca/Arboles/Acacia_pennatula/8_Fichas_de_venta/Huizache_v2.pdf f 7 Secretaría.
3. Cruz M.U., López B. C. y Negreros C. P. (2011). Una especie multiusos del trópico mexicano *Trema micrantha* (L.) Blume. *Ciencias* 101, enero-marzo, 16-22. [En línea]
4. Ficha técnica 1856. *Trema micrantha* (L.) Blume. Museum Botanicum 2: 58. 1856. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/69-ulmac2m.pdf
5. López C. 2004. "Amate" papel de corteza mexicano [*Trema micrantha* (L.) Blume]: Nuevas estrategias de extracción para enfrentar la demanda del mercado. Cap. 20. En: Alexiades N. M. y Shanley P. (editores). Productos forestales, medios de subsistencia y conservación. Vol. 3-América Latina. 499 p.
6. Córdoba, F. R. 2005 Conceptos básicos sobre el secado de la madera Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 2(5). Consultado en línea en: http://www.tec.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/anteriores/anterior5/pdf/Solucion%201.pdf. (consultado el 23 de julio del 2024).
7. Núñez, C. E. (2007). Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. Revista Ciencia Tecnología 9: 44-50. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/69-ulmac2m.pdf
8. Farfán B., E. G. 1988. Uso actual y perspectivas de dos especies del género de acacia en el suroeste de Puebla. Tesis profesional. División de ciencias forestales. Universidad autónoma Chapingo. México, 87.
9. Dávalos, S. R., Rodríguez, M. M. I. y Martínez, P. C. E. 2008. Almacenamiento de carbono. En: Mason, R.H., Hernández, O. V., Gallina, S. y Mehlreter, K. Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación. Instituto de ecología A.C. (INECOL) e Instituto nacional de ecología (INE-SEMARNAT), México, 223-233.
10. Chan C.G, De Jong B.H.J, González V. N.A, López H.J.C, Morales R. D.E, Venegas V. J.A, Reyes S.M, Aryal D.R (2022) Densidad de madera de especies arbóreas dominantes de la selva tropical subperennifolia de Calakmul, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 9:3. DOI: 10.19136/era.a9n3.3386.
11. Suchsland, O. 2004. The swelling and shrinkage of wood. A practical technology primer. Forest Products Society. Madison WI, USA. 189 p.
12. Torrelli, N. 1982. Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas. Programa de cooperación científica y técnica México-Yugoslavia. SARH.SFF., México, D.F. 73.
13. Manrique, S., Franco, J., Núñez, V. y L. Seghezze. 2009. Índice de valor combustible de arbustales naturales y su potencialidad como cultivos energéticos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 13: 47-56
14. Bárcenas, P. G. M. y Ordoñez, C. V. R. 2008. Calidad de la madera de los árboles de sombra. En: Mason, R.H., Hernández, O. V., Gallina, S. y Mehlreter, K. Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación. Instituto de ecología A.C. (INECOL) e Instituto nacional de ecología (INE-SEMARNAT), México, 235-246.
15. Fuentes S., M. 1988. Apuntes para el curso de tecnología de la madera 1. Serie de apoyo académico No. 33. División de ciencias forestales universidad autónoma Chapingo. México. 99.
16. Ordóñez C., V. R.; Bárcenas P., G. M.; Quirós A. 1990. Características físico-mecánicas de la madera de diez especies de San Pablo Macuiltianguis, Oax. La Madera y su Uso. No. 21, Instituto de Ecología, A. C.-Universidad Autónoma Metropolitana. 30.

Características anatómicas de la madera de 2 especies forestales

Apolinar, HF¹ y Honorato, SJA¹

¹ Campo Experimental San Martinito-INIFAP

apolinar.flora@inifap.gob.mx

honorato.amador@inifap.gob.mx

1. Resumen

Cada tipo de madera tiene características anatómicas únicas que permiten diferenciar una especie de otra. El objetivo de este trabajo fue analizar las características anatómicas microscópicas de la madera de *Trema micrantha* y *Acacia pennatula*. Se colectaron 3 árboles de cada especie, de cada árbol se obtuvieron 2 rodajas y después se cortaron cubos de 1.5 cm de lado para preparar cortes histológicos y material disociado. Se encontraron diferencias entre ambas especies. *A. pennatula* presenta porosidad difusa, poros solitarios, poco agregados y medianos, elementos de vaso cortos, radios multiseriados angostos y uniseriados; parénquima paratraqueal aliforme escaso, vasicéntrico, en bandas y en bandas confluyente, fibras de longitud medianas y anchura fina. *Trema micrantha* presenta porosidad difusa, poros solitarios y agregados y medianos, elementos de vaso medianos, con predominancia de radios biseriados, moderadamente angostos con gomorresinas, parénquima paratraqueal vasicéntrico y en bandas cortas, fibras de longitud corta y de anchura mediana.

2. Introducción

El estudio de las características anatómicas de la madera de las especies forestales, tanto a nivel macroscópico como microscópico, permite conocer la estructura celular de la madera, facilitando así su identificación científica a nivel de familia, género y especie. ^[1] La falta de conocimiento sobre estas características anatómicas a menudo lleva al uso inadecuado de las especies, lo que resulta en un bajo rendimiento durante su vida útil, ya que no cumplen con las especificaciones requeridas para las aplicaciones a las que están destinadas. ^[2] Por tanto, su caracterización es fundamental para determinar su uso más adecuado. Existen especies que se comercializan comúnmente en las zonas rurales para construcciones rústicas o como leña, pero carecen de estudios anatómicos y tecnológicos, lo que limita el conocimiento de las características de su madera y, en consecuencia, su promoción en el mercado local y nacional. Esta situación limita la promoción de estas especies y son poco conocidas en el mercado local y nacional. *Acacia pennatula* y *Trema micrantha* son dos especies forestales que son usados comúnmente para construcciones rústicas y como leña, *A. pennatula* es

una madera dura y pesada útil para ensambladura, ebanistería, postes para cercas, leña y carbón, además de servir como barreras rompe viento, alimento para ganado y como árboles de sombra. ^[3] Por otro lado, *Trema micrantha* es una especie de rápido crecimiento, con madera liviana, que se emplea en construcciones ligeras, vigas, tablas, leña y como árbol de sombra para el cultivo de café. ^{[4][5]}

Existen algunos estudios sobre la anatomía de *T. micrantha* que reportan porosidad difusa, solitarios y algunos agregados moderadamente escasos (6 mm²); con diámetro tangencial promedio de 158 µm, los elementos de vaso presentan una longitud media (467 µm), con placas de perforación simple y punteaduras intervasculares. El parénquima axial es paratraqueal vasicéntrico escaso, parénquima radial está compuesto de radios numerosos (9 por mm), biseriados, uniseriados y triseriados, con una longitud promedio de 683 µm. Las fibras son de tipo libriforme, medianas, con una longitud promedio de 1252 µm y de pared celular muy delgada. ^[6]

Se ha reportado que la madera de *Acacia pennatula* presenta porosidad difusa, poros numerosos (8.82 mm²), solitarios y algunos agregados con una longitud de vasos de 248 µm, con fibras de longitud mediana (1090.68 µm), con diámetro fino (16.56 µm) con pared celular muy gruesa (13.38 µm). En su mayoría los radios son multiseriados, de altura baja (391.33 µm) y moderadamente angostos (29.73 µm). El parénquima axial es paratraqueal en bandas, en bandas confluentes y vasicéntrico. Además, presenta inclusiones de gomas de color castaño rojizo en los elementos vasos y una abundancia de cristales romboidales en el parénquima axial y en células especializados (idioblastos). ^[7] Con el fin de profundizar en el conocimiento anatómico de la madera, el objetivo de este estudio fue analizar las características anatómicas microscópicas de la madera de *Trema micrantha* y *Acacia pennatula*.

3. Condiciones experimentales

Se colectaron muestras de madera de *Trema micrantha* y *Acacia pennatula*, en los municipios de Zongolica y Naranjal en el estado de Veracruz. De cada especie, se seleccionaron 3 árboles y se obtuvieron dos rodajas de cada uno, una de la base y una de la punta de la muestra. Posteriormente se prepararon cubos de 1.5 cm de lado, obteniendo un total de 29 cubos para *Trema micrantha* y 18 de *Acacia pennatula*. Los mismos cubos se utilizaron para el material disociado y los cortes histológicos.

3.1 Material disociado

Para preparar el material disociado, se cortaron astillas de los extremos y la parte media de los cubos, las cuales se colocaron en viales de vidrio en una solución de Jeffrey (ácido crómico y ácido nítrico al 10%, 1:1 v/v), para facilitar su maceración y desmenuzamiento. Las muestras de *Trema micrantha* permanecieron tres días en la solución, mientras que las de *Acacia pennatula* estuvieron ocho días. La muestra estuvo lista cuando adquirió un color blanquecino y pudo separarse con facilidad usando una aguja de disección. Una vez ablandado el material, se lavó con agua destilada

para eliminar residuos de la solución, manteniéndolo en agua destilada para evitar su secado. Luego, las muestras se tiñeron con azul de toluidina y se montaron en un portaobjetos, utilizando un microscopio estereoscópico.

3.2 Cortes histológicos

Para obtener los cortes histológicos, los cubos se sometieron a un proceso de ablandamiento. Los cubos de *Trema micrantha* se colocaron en ebullición en un matraz Erlenmeyer con una solución de agua destilada, glicerol y alcohol (1:1:1 v/v) durante una semana. Para *Acacia pennatula*, se usó una solución de glicerol y ácido acético al 10% (1:1 v/v) durante un mes, seguida de una solución de etilendiamina al 4% durante 82 horas. Una vez ablandados los cubos, se realizaron cortes transversales y tangenciales con un micrótopo, con un espesor de 25 micras para *Trema micrantha* y 50 micras para *Acacia pennatula*, posteriormente los cortes se tiñeron con safranina y azul de toluidina, luego se lavaron con agua destilada para eliminar el exceso de colorante y finalmente se montaron en portaobjetos para realizar las mediciones.

3.3 Mediciones

Se tomaron fotografías digitales (640x480 píxeles) del material disociado y de los cortes histológicos, capturadas con el programa Motic Image Plus 2.0 en un microscopio óptico. Las mediciones realizadas fueron las siguientes: en el material disociado se midió la longitud, diámetro, lumen y grosor de pared de las fibras, así como el diámetro y longitud de los elementos de vaso. En los cortes histológicos, en la sección transversal se midió el diámetro tangencial y radial de los poros (definidos como vasos cortados transversalmente), número de poros por mm². En la sección tangencial se midió la longitud, ancho de los radios, número de series y número de radios por mm lineal.

El número total de mediciones se calculó realizando primero 30 mediciones para después obtener el promedio y la varianza, ^[8] determinando el tamaño de muestra con la expresión siguiente (1).

$$n = \frac{t_{\alpha/2}^2 s^2}{e^2} \quad (1)$$

Donde:

n = tamaño de muestra

$t_{\alpha/2}$ = valor de la distribución de t

s² = varianza de la muestra

e = error de estimación.

Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) seguido de una comparación múltiple de medias con el procedimiento de Tukey ($\alpha = 0.05$), usando el programa estadístico SAS ^[9] y la clasificación de las características anatómicas se realizó con base en el trabajo de Tortorelli. ^[10]

4. Resultados y discusión

La madera de *Trema micranta* presenta una porosidad difusa, con poros de contorno ovalado y circular, solitarios y algunos agregados de 2 y 3, además de otros en disposición radial muy pocos (12.44 mm^2). El diámetro tangencial promedio es de $128 \text{ }\mu\text{m}$ (mediano) y radial de $138.24 \text{ }\mu\text{m}$. Estos resultados difieren de otro estudio, donde se reportó menos poros por mm^2 (6 mm^2), mayor diámetro tangencial ($158 \text{ }\mu\text{m}$), además de una agrupación y distribución de los poros ^[6]. Los elementos de vaso en este estudio son medianos ($333.34 \text{ }\mu\text{m}$) y diámetro de $166.07 \text{ }\mu\text{m}$, con una placa de perforación simple y punteaduras intervasculares. En comparación con otros resultados, la longitud promedio reportada es mayor ($467 \text{ }\mu\text{m}$) ^[6]. El parénquima radial presenta radios poco numerosos (7.55 por mm), principalmente biseriados con una longitud de $502.22 \text{ }\mu\text{m}$ y una anchura de $34.63 \text{ }\mu\text{m}$, con células procumbentes que contienen gomorresinas de color negro. Estos comparado con otros datos es mayor el número de radios (9 mm) y la longitud ($683 \text{ }\mu\text{m}$) y coinciden en el contenido de células procumbentes que las hacen parece de color negro ^[6]. Las fibras son de tipo libriforme, con una longitud de $819 \text{ }\mu\text{m}$, un espesor de pared de $3.89 \text{ }\mu\text{m}$, lumen de $20.48 \text{ }\mu\text{m}$ y un diámetro mediano ($27.96 \text{ }\mu\text{m}$), comparado con otro trabajo, la longitud de la fibra es mucho mayor ($125.2 \text{ }\mu\text{m}$) respecto a este estudio y una pared más delgada ($2 \text{ }\mu\text{m}$). ^[6]

En la madera de *Acacia pennatula*, la porosidad también es difusa, con poros de contorno circular y semicircular, en su mayoría solitarios, aunque algunos se agrupan en agregados de 2, 3 y 4 poros, siendo numerosos (13 mm^2). Los poros son de tamaño mediano, con un tangencial de $118.99 \text{ }\mu\text{m}$ y un diámetro radial de $112.72 \text{ }\mu\text{m}$. En comparación con los datos reportados para la misma especie, se observó un menor número de poros (8.82 mm^2) y un diámetro tangencial inferior ($84.31 \text{ }\mu\text{m}$). ^[7] Los elementos vasos en este estudio son cortos con longitud de $212.54 \text{ }\mu\text{m}$, de diámetro mediano ($152.42 \text{ }\mu\text{m}$), con placas de perforación simple y punteaduras intervasculares. Este resultado es similar a la longitud del elemento vaso ($248.35 \text{ }\mu\text{m}$) reportado en otro estudio ^[7]. En el parénquima radial, los radios son poco numerosos (6.73 por mm), en su mayoría son multiseriados aunque hay uniseriados y biseriados, normalmente espaciados, se encuentran en series verticales de 1 a 8 células, son bajos con una altura de $341.99 \text{ }\mu\text{m}$ y en relación a la anchura se consideran moderadamente angostos ($32.89 \text{ }\mu\text{m}$), en algunos radios se presentan grandes cristales romboidales de 14 a $51 \text{ }\mu\text{m}$ de ancho. En otro estudio, la altura de los radios fue mayor ($391.33 \text{ }\mu\text{m}$) y la anchura menor ($29.73 \text{ }\mu\text{m}$) ^[7]. La fibra son de tipo libriforme, de longitud mediana ($932.72 \text{ }\mu\text{m}$), con relación al diámetro son finas ($17.64 \text{ }\mu\text{m}$), con un grosor de pared de $3.94 \text{ }\mu\text{m}$ y un lumen de $9.76 \text{ }\mu\text{m}$. Estos datos difieren de otro trabajo en el que se reportó una mayor longitud de fibra ($1090.68 \text{ }\mu\text{m}$) y un menor diámetro ($16.56 \text{ }\mu\text{m}$) para la misma especie ^[7].

Existe una diferencia significativa ($\alpha=0,05$) entre los diámetros tangenciales y radiales de los elementos de vaso de las especies estudiadas, siendo mayores en *Trema micrantha* con 128.0 μm y 138.3 μm respectivamente. Sin embargo, *Acacia pennatula* tiene mayor número de poros (13.5 mm^2) (Tabla 1).

TABLA 1. DIÁMETROS TANGENCIAL Y RADIAL DE LOS ELEMENTOS DE VASO

Poros	Especies	
	<i>Acacia pennatula</i>	<i>Trema micrantha</i>
Tangencial (μm)	118.99 B	128.90 A*
Mínimo	10.6	10.6
Máximo	230.7	217.6
Radial (μm)	112.72 B	138.24 A
Mínimo	35.9	10.1
Máximo	242.6	254
mm^2	13.54 A	12.44 B

*Valores con la misma letra no son significativamente diferente ($p \leq 0.05$)

En los elementos de vaso, la longitud y el diámetro de los elementos son diferentes entre las especies, siendo más largos y anchos en *Trema micrantha* (Tabla 2).

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DE VASO

Elementos vasculares (μm)	Especies	
	<i>Acacia pennatula</i>	<i>Trema micrantha</i>
Longitud	212.54 B	333.34 A*
Mínimo	100.7	111.3
Máximo	393.6	643.6

Diámetro	152.42 B	166.073 A
Mínimo	60.9	54.6
Máximo	307.8	360.7

*Valores con la misma letra no son significativamente diferente ($p \leq 0.05$)

En los radios, la longitud, el ancho y el número de radios por mm en *Trema micrantha* son mayores que en *Acacia pennatula*, aunque esta última presenta una menor cantidad de series por radio (Tabla 3).

TABLA 3. DIMENSIONES DE LOS RADIOS

Radios(μm)	Especies	
	<i>Acacia pennatula</i>	<i>Trema micrantha</i>
Longitud	341.99 B	502.22 A*
Mínimo	180	144.7
Máximo	735.7	948
Ancho	32.89 B	34.63 A
Mínimo	12.3	10.2
Máximo	65.1	86.2
Serie	3.17 A	2.35 B
Mínimo	1	1
Máximo	6	5
Radios/mm	6.73 B	7.55 A

*Valores con la misma letra no son significativamente diferente ($p \leq 0.05$)

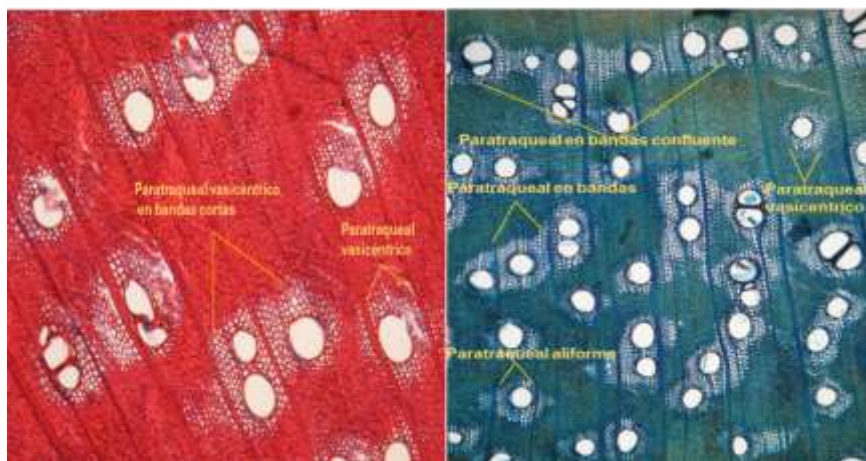
En cuanto a las fibras, *Acacia pennatula* tiene una mayor longitud (932.72 μm) en comparación con *Trema micrantha*, que a su vez presenta un mayor en diámetro (27.96 μm) y lumen (20.48 μm), sin diferencias significativas en el grosor de pared entre ambas especies.

TABLA 4. DIMENSIONES DE FIBRAS

Fibras (µm)	Especies	
	<i>Acacia pennatula</i>	<i>Trema micrantha</i>
Longitud	932.72 A	819.51 B*
Mínimo	100.2	104.6
Máximo	1527.6	1307.4
Diámetro	17.64 B	27.96 A
Mínimo	9.8	12.1
Máximo	21.6	53.6
Lumen	9.76 B	20.48 A
Mínimo	3.3	6.2
Máximo	16.8	43.8
Grosor de pared	3.94 A	3.89 A
Mínimo	1	1.05
Máximo	9.1	12

*Valores con la misma letra no son significativamente diferente ($p \leq 0.05$)

En la madera de *Trema micrantha*, el parénquima axial es paratraqueal vasicéntrico y se presenta en bandas cortas, mientras que en *Acacia pennatula* el parénquima paratraqueal es aliforme escaso, vasicéntrico, en bandas y en bandas confluentes (Figura 1). Estos resultados coinciden con estudios previos, donde se reporta que en *T. micrantha* el parénquima paratraqueal es vasicéntrico escaso,^[6] mientras que en *A. pennatula*, se reporta el parénquima paratraqueal en bandas, en bandas confluentes y vasicéntrico.^[7]



Trema micrantha

Acacia pennatula

Figura 1. Tipos de parénquima axial en sección transversal

5. Conclusiones

Los resultados muestran diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) en las características anatómicas de la madera de las especies estudiadas. La madera de *Trema micrantha* presenta poros más grandes, así como elementos de vaso y radios más largos y anchos, además de un mayor número de radios por mm. En contraste, la madera de *Acacia pennatula* se caracteriza por un mayor número de poros por mm², y por tener fibras más largas y delgadas. Estas diferencias resaltan la diversidad anatómica de la madera de ambas especies.

6. Bibliografía

1. Saldaña, S.C.R. 2005. Caracterización Anatómica de la Madera de Cuatro especies Forestales utilizadas en el Aserradero del CIEFOR Puerto Almendras. Tesis profesional. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.
2. Pérez, O.C.P, Quintanar, I.A. 1994. Características anatómicas de la madera de cinco especies del estado de Jalisco. Acta Botánica Mexicana, 27:75-87
3. Pronatura Veracruz. Red de Viveros de Biodiversidad. https://revivemx.org/Fototeca/Arboles/Acacia_pennatula/8_Fichas_de_venta/Huizache_v2.pdf f 7Secretaría.
4. Cruz M.U., López B. C., Negreros, C. P. 2011. Una especie multiusos del trópico mexicano *Trema micrantha* (L.) Blume. Ciencias 101, enero-marzo, 16-22. [En línea
5. Gutiérrez C.L., Dorantes L. J. 2004. Especies forestales de uso tradicional del estado de Veracruz (Potencialidades de especies con uso tradicional del estado de Veracruz, con opción para establecer plantaciones forestales comerciales). CONAFOR-CONACYT-UV. México, 210
6. Barajas, M. J. G., Álvarez, A, Solís, S. P. 1997. Anatomía de la madera de Mexico: especies de una selva alta perenifolia1, Publicaciones especiales Instituto de Biología, UNAM, Mexico, D.F. 126.

7. Farfán B., E. G. 1988. Uso actual y perspectivas de dos especies del género de Acacia en el suroeste de Puebla. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad autónoma Chapingo. México. 87
8. Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., Ye, K. 2012. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Novena edición. Pearson Education, Inc. México, D. F. 791 p.
9. SAS Institute Inc. (SAS). 2000. The SAS system for windows (Version 8.0 for Windows). Cary, NC. USA.
10. Tortorelli, L. A. 1956 Maderas y Bosques Argentinos, ACME, S.A.C.I, Buenos aires. 910 p

Estimación de parámetros de calidad del agua basada en datos

León, S. A.¹ Gutiérrez. R. E ², Rodríguez Chaparro, T

¹ Universidad Militar Nueva Granada

² Tecnológico de Monterrey

est.santiago.leon@unimilitar.edu.co

adela.rodriguez@unimilitar.edu.co

rgutierrezc@tec.mx

1. Resumen

Este artículo propone desarrollar un algoritmo basado en modelos de regresión para predecir valores de salida de ORP, pH, Conductividad, Color aparente y Turbidez de salida para situaciones donde cualquiera de estas variables está ausente. Se emplea un enfoque con modelos aditivos generalizados (GAM) para capturar de manera efectiva las relaciones no lineales entre las variables. Los resultados demuestran una alta precisión en las predicciones, con un margen de error (MAPE) mínimo del 4.9% para el pH y un margen máximo del 13% para la turbidez. Este enfoque puede ser aplicable a sistemas de monitoreo, mejorando la gestión y toma de decisiones en la gestión del agua.

2. Introducción

El monitoreo de la calidad del agua a partir de variables como el ORP, pH, Conductividad, Color aparente y la turbiedad es fundamental para asegurar su seguridad y adecuación para diversos usos. Sin embargo, existen casos en los cuales no se cuenta con todos los sensores necesarios para medir estas variables y puede existir la ausencia de la medición de alguno de estos valores. Estos casos se presentan debido a que estos sensores pueden llegar a representar un alto costo, requieren personal capacitado para su uso y mantenimiento, conllevan tiempos de medición más largos de los esperados, etc. Gracias a esto, podemos plantearnos: ¿Cómo se puede desarrollar un sistema capaz de poder estimar el valor de una variable, a partir de mediciones alternativas de otras variables?

En la actualidad, la predicción de variables relacionadas con la calidad del agua es una preocupación creciente. En 2020, un estudio titulado "Machine Learning Predictions of pH in the Glacial Aquifer System, Northern USA" demostró que mediante árboles de regresión se podía predecir el pH con una precisión del 60% ^[1]. Otro estudio, "Turbidity prediction of lake-type raw water using random forest model based on meteorological data: A case study of Tai lake, China.", utilizó un modelo de árboles aleatorios para predecir la turbidez en diferentes muestras de agua ^[2]. Aunque estos estudios han logrado avances significativos, las variables de correlación empleadas están mayormente vinculadas con factores ambientales como la geología y el clima, en lugar de parámetros intrínsecos del agua, lo que puede limitar la precisión de los modelos.

Para mejorar la predicción de la calidad del agua, algunos estudios han explorado el uso de variables como el pH, la conductividad y la turbidez como entradas. Por ejemplo, el artículo "Water Quality Prediction Based on Machine Learning and Comprehensive Weighting Methods" empleó algoritmos de máquinas de soporte vectorial y bosques aleatorios, junto con el coeficiente de correlación de Pearson, para predecir nitrógeno, fósforo y NH₃ ^[3]. Otro estudio, "A Review of the Application of Machine Learning in water quality evaluation", mostró cómo varios de estos algoritmos pueden utilizar variables como el pH y la conductividad para predecir el oxígeno disuelto ^[4]. De esta manera, existen también artículos como "prediction of water quality parameters using machine learning models: a case of study of the Karun River, Iran" el cual predice valores de DQO y DBO teniendo parámetros de calidad de agua como entrada ^[5]. Aunque estos estudios demuestran la capacidad de predecir ciertas variables de calidad del agua a partir de otras, las predicciones no suelen incluir correlaciones entre las mismas variables. Este artículo pretende abordar esta limitación, proponiendo un enfoque para predecir ORP, conductividad, color aparente, turbidez y pH utilizando estas mismas variables para mejorar la ausencia de predicción en estas variables.

3. Condiciones experimentales

3.1 Pre procesamiento de datos.

Para dar inicio al experimento, se procedió con la recolección de datos. Se utiliza un documento en Excel que contiene datos obtenidos del proyecto IMP ING 3406, titulado "Operación de humedal aireado con vegetación", llevado a cabo por el grupo de investigación Agua y Energía (AyE) de la Universidad Militar Nueva Granada. Esta base de datos abarca 32 variables diferentes, incluyendo mediciones de fósforo total, nitrógeno total, oxígeno disuelto, pH, ORP, turbidez, color aparente, color real, alcalinidad, sulfatos, sólidos totales, volumen y conductividad, tanto en condiciones de entrada como de salida. Las mediciones fueron realizadas durante un periodo aproximado de 5 meses, utilizando equipos de la marca Hanna Instruments.

Aunque se dispone de una lista de datos, algunas variables presentan una cantidad significativa de valores ausentes o que hipotéticamente carecen de relevancia para establecer correlaciones significativas. Por esta razón, se decide omitir ciertas variables y centrarse únicamente en las mediciones de ORP, pH, color aparente, turbidez y conductividad en sus valores de salida. Después

de aplicar este filtro, la variable de conductividad aún presenta valores ausentes. Sin embargo, se decide no descartar esta última variable debido a su potencial relevancia en la identificación de correlaciones significativas. Además, la cantidad de valores faltantes en la conductividad es menor en comparación con las variables que fueron descartadas. Con base en esta observación, se infiere que los valores faltantes de conductividad podrían estimarse mediante el uso de fórmulas de correlación. Para abordar esta situación, se desarrolla un algoritmo que, basado en correlaciones, permite predecir un valor estimado de la conductividad en puntos específicos.

Gracias al filtro de variables y al algoritmo implementado, se logra obtener una lista de datos con valores completos, lista para su posterior manipulación y análisis.

3.2 Procesamiento de datos y realización del algoritmo.

Una vez obtenida la limpieza de datos para su elaboración, para comprender mejor cómo es el funcionamiento de la correlación de los datos, se realiza un análisis exploratorio de datos (EDA) en el cual vemos el comportamiento de la interacción entre cada una de estas variables gracias a un Heatmap, permitiéndonos observar aquellas que poseen mayor y menor correlación, siendo los valores cercanos a 1 y -1 los que poseen mayor correlación (Figura 1).

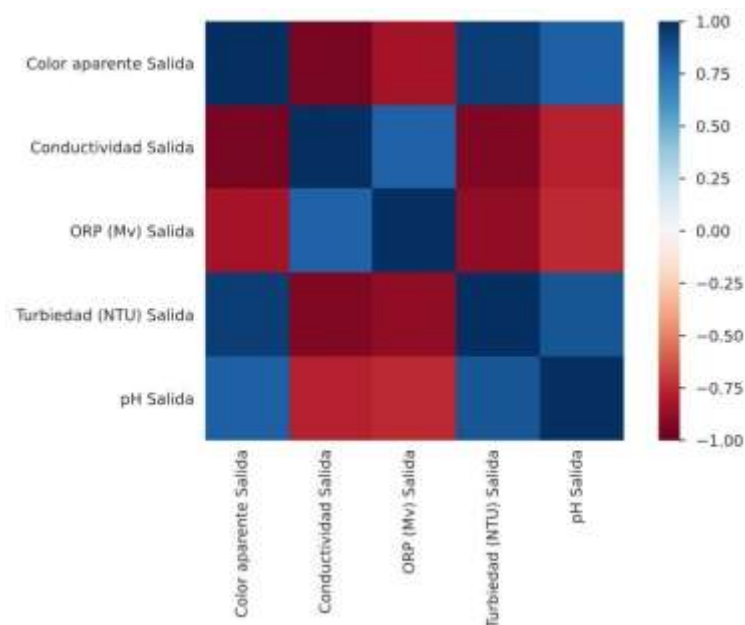


Figura 1. Heatmap de correlación entre variables.

Para abordar la solución propuesta, es fundamental identificar el modelo de predicción que mejor se ajuste a nuestras variables. Con este objetivo, se exploran diversos métodos utilizando la variable ORP Salida en cada uno de ellos, con el fin de evaluar su desempeño y determinar cuál ofrece el menor error. Se consideran tres enfoques: un modelo de regresión lineal simple, que muestra un error promedio del 17.07% en comparación con los valores reales; un modelo basado en árboles de decisión, con un error promedio de 16.39%; y un modelo aditivo generalizado (GAM), que presenta un error promedio del 9.3%. Es importante destacar que estos errores reflejan la diferencia entre los valores predichos y los valores reales, manteniendo las mismas unidades que las variables analizadas. Dado que el modelo GAM presenta el menor error, se selecciona para la implementación en nuestro algoritmo.

El modelo GAM (Generalized Additive Model) se destaca por su capacidad de ajustar la tendencia global de los datos de manera flexible, especialmente cuando no existe una correlación lineal evidente entre las variables. Esta flexibilidad trata con datos que requieren un enfoque no lineal para capturar las relaciones subyacentes. GAM permite visualizar gráficamente cómo se ajustan las tendencias a los datos (Figura 2). Además, este modelo es altamente eficaz para incorporar predictores categóricos e interacciones, lo que se busca con nuestro proyecto.

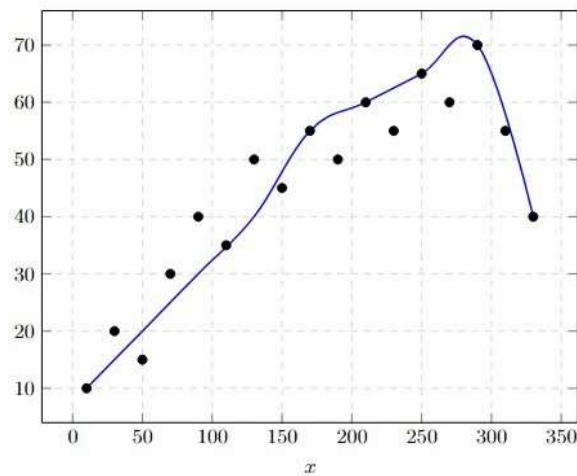


Figura 2. Ejemplo gráfico modelo GAM.

Además, este modelo es altamente eficaz para incorporar predictores categóricos e interacciones, lo que se busca con nuestro proyecto. El modelo GAM segmenta el conjunto de datos dentro de segmentos diferentes llamados knots, es decir, de 0 a 50, de 50 a 100 y así sucesivamente. Luego, en cada uno de los knots trabaja con splines los cuales son funciones matemáticas que se utilizan para aproximar la línea de ajuste al valor más óptimo para que pierda la menor cantidad de información sobre los datos posible, estos splines mayormente suelen ser funciones cúbicas. La suavidad de estos splines depende de un valor lambda el cual se menciona en la fórmula más adelante. Una lambda alto resulta en un spline más suave y menos flexible, mientras que una lambda bajo permite más flexibilidad y un ajuste más cercano a los datos.

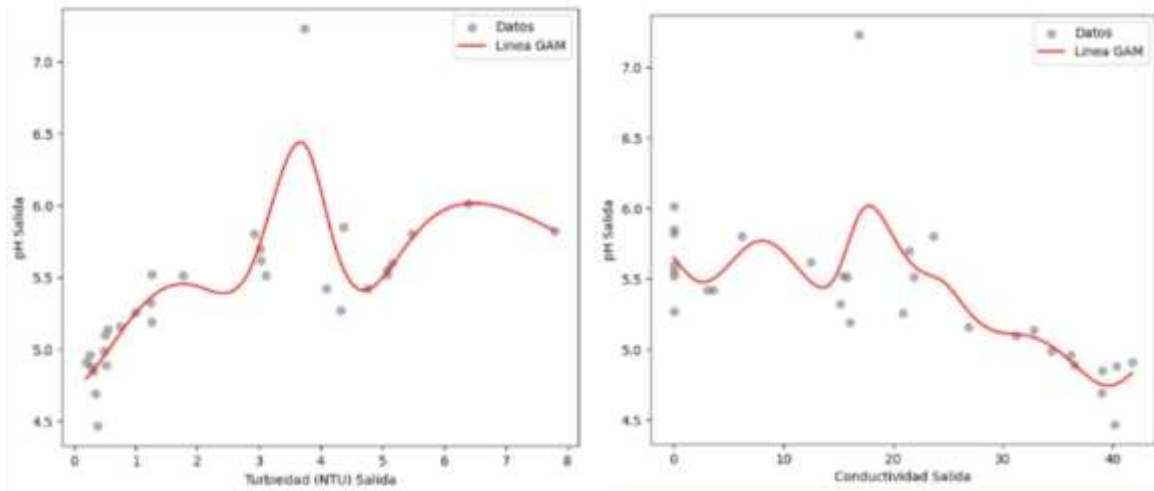
GAM también puede ser aplicado en un enfoque multivariable, lo que lo diferencia del modelo simple mencionado previamente. En lugar de ajustar la línea de tendencia basándose únicamente en una variable, el modelo GAM multivariable permite incorporar múltiples variables para capturar las relaciones entre ellas de manera más completa. Por ejemplo, en nuestro caso, un modelo GAM simple podría predecir el pH utilizando solo el valor de la turbidez. Sin embargo, al aplicar un modelo GAM multivariable, podríamos predecir el pH considerando no solo la turbidez, sino también el color aparente, el ORP y todas las demás variables disponibles en nuestro conjunto de datos. La fórmula de aplicación del modelo GAM multivariable es la siguiente:

$$\mathbb{E}(Y|X_1, X_2, \dots, X_p) = \alpha + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_p(X_p) \quad (1)$$

El modelo se expresa como una combinación lineal de funciones suavizadas aplicadas a las variables independientes. El valor esperado de la variable dependiente se modela como la suma de estas funciones más una constante alpha, que actúa como el término de intersección. Las funciones suavizadas permiten capturar relaciones no lineales entre las variables independientes y la respuesta, proporcionando flexibilidad en el modelado comparado con los modelos lineales tradicionales.

La aplicación de este método en nuestro estudio se enfoca en determinar el valor esperado de la variable dependiente que deseamos predecir. A continuación, identificamos las variables predictoras y suavizadas, donde cada una está asociada a una función de suavizado específica. Es crucial que este suavizado sea óptimo; si el suavizado es excesivo, se corre el riesgo de subajuste (underfitting), lo que impediría captar la complejidad necesaria de los datos en nuestro problema. Por otro lado, un suavizado insuficiente podría llevar a un sobreajuste (overfitting), capturando más detalles de los necesarios durante el entrenamiento y generando un modelo sobreentrenado.

Para optimizar el modelo GAM multivariable, se analizan individualmente las correlaciones entre cada variable predictora y la variable dependiente. Esto permite encontrar el valor de lambda (suavizado) más adecuado para cada relación, como por ejemplo en los casos de pH vs. turbidez, pH vs. color aparente, pH vs. ORP, entre otros para luego sumarlos todos entre sí (Figura 3).



(a)

(b)

Figura 3. Ejemplo correlaciones modelo GAM multivariable: (a) pH Vs Turbiedad y (b) Ph Vs Conductividad

Es importante destacar que no es posible aplicar un mismo valor de lambda a todas las correlaciones, ya que cada conjunto de datos puede seguir distribuciones diferentes. Una vez determinado el valor óptimo de lambda para cada correlación, estos valores se incorporan en el modelo, asegurando que los suavizados se ajusten de manera precisa a cada una de las variables independientes.

4. Resultados y discusión

Para evaluar la eficiencia de nuestro modelo, primero se calcula el Error Cuadrático Medio (MSE). El MSE proporciona una medida de la media de los errores al cuadrado entre los valores predichos por el modelo y los valores reales. Este indicador es útil para cuantificar la precisión del modelo, pero presenta el inconveniente de que sus unidades están elevadas al cuadrado en comparación con las unidades originales de la variable de respuesta. Para resolver este inconveniente, se calcula el Error Cuadrático Medio de la Raíz (RMSE), que nos permite expresar el error en las mismas unidades que la variable de respuesta. El RMSE se obtiene simplemente tomando la raíz cuadrada del MSE. Para determinar el porcentaje de error del modelo en relación con los valores reales, se calcula el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE). Este indicador nos ofrece una medida porcentual de la desviación del modelo en comparación con los valores observados (RMSE vs Valores reales). La fórmula para calcular el MAPE se expresa de la siguiente manera:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| * 100 = \frac{RMSE}{PromedioDatos} * 100 \quad (2)$$

A partir de ello, se tiene el error promedio del algoritmo al momento de predecir cada una de las variables:

Tabla 1. Porcentaje de error en la predicción de diferentes variables de salida.

Variables (SALIDA)	Porcentaje de error en sus predicciones con respecto a su valor real
ORP	9.3%
Ph	4.9%
Color aparente	12%
Conductividad	12.7%
Turbiedad	13%

Como se puede observar, pH es la que tiene menor error (4,9%) y turbiedad es la que mayor error tiene (13%), gráficamente, los datos predichos vs los verdaderos de cada una de estas variables se ven de la siguiente manera:

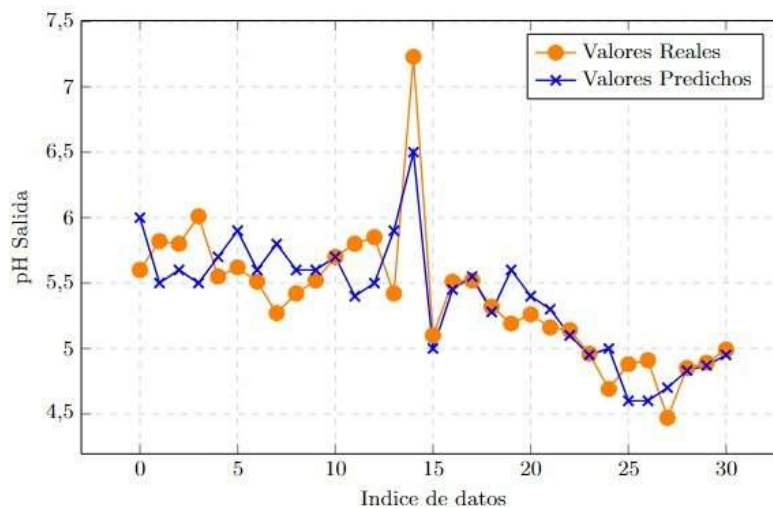


Figura 4. Comparación entre los valores reales y predichos del pH de salida

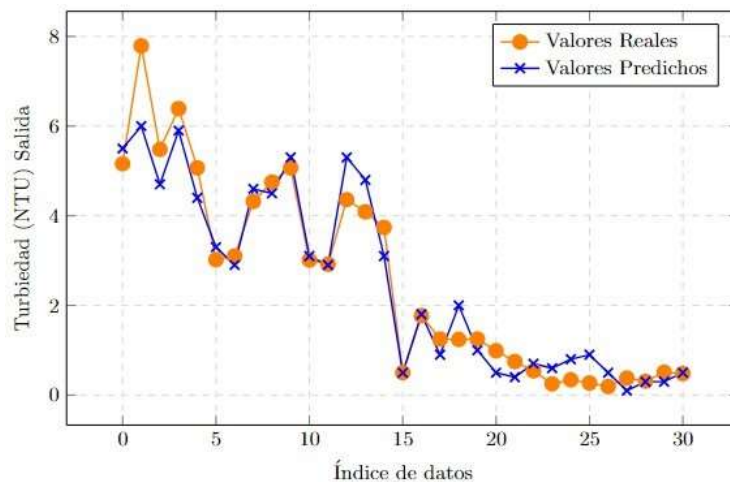


Figura 5. Comparación entre los valores reales y predichos del Turbiedad de salida

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que, aunque existen correlaciones de diferentes magnitudes entre las variables, el algoritmo predice valores dentro de un rango óptimo. El error promedio máximo registrado fue del 13%, lo que sugiere que el modelo GAM multivariado es efectivo para cumplir con los objetivos planteados. Sin embargo, es importante destacar que el rendimiento del modelo podría mejorarse mediante un análisis más exhaustivo de los datos. Actualmente, el conjunto de datos consta de solo 32 observaciones, lo cual es insuficiente para realizar un estudio profundo y robusto. Sería beneficioso explorar la incorporación de otros tipos de relaciones, como las interacciones entre variables de entrada y variables de salida. Este tipo de análisis no solo mejoraría la comprensión del comportamiento de las correlaciones, sino que también permitiría optimizar el modelo. Aunque las limitaciones de tiempo impidieron la exploración de estas relaciones en este estudio, se recomienda que investigaciones futuras consideren estas variaciones para mejorar la precisión y la capacidad predictiva del algoritmo.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por el apoyo financiero a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, por medio del proyecto IMP-ING 3912.

6. Bibliografía

21. Stackelberg, P. E., Belitz, K., Brown, C. J., Erickson, M. L., Elliott, S. M., Kauffman, L. J., Ransom, K. M., & Reddy, J. E. (2020). Machine Learning Predictions of pH in the Glacial Aquifer System, Northern USA. Ground Water, 59(3), 352-368. <https://doi.org/10.1111/gwat.13063>
22. Zhang, Y., Yao, X., Wu, Q., Huang, Y., Zhou, Z., Yang, J., & Liu, X. (2021c). Turbidity prediction of lake-type raw water using random forest model based on meteorological data: A case study of Tai lake, China. Journal Of Environmental Management, 290, 112657. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112657>
23. Wang, X., Li, Y., Qiao, Q., Tavares, A., & Liang, Y. (2023). Water Quality Prediction Based on Machine Learning and Comprehensive Weighting Methods. Entropy, 25(8), 1186. <https://doi.org/10.3390/e25081186>
24. Zhu, M., Wang, J., Yang, X., Zhang, Y., Zhang, L., Ren, H., Wu, B., & Ye, L. (2022b). A review of the application of machine learning in water quality evaluation. Eco-Environment & Health, 1(2), 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2022.06.001>
25. Nouraki, A., Alavi, M., Golabi, M., & Albaji, M. (2021b). Prediction of water quality parameters using machine learning models: a case study of the Karun River, Iran. Environmental Science And Pollution Research, 28(40), 57060-57072. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14560-8>

**Acreditación de un programa educativo de nivel licenciatura por parte
de organismo evaluador nacional en el periodo 2017-2022.**

***Caso de estudio: Licenciatura en Tecnologías de Información
Escuela Superior de Tizayuca, Universidad Autónoma del Estado
de Hidalgo***

Solís, A.E.¹, Hernández, S.L.¹, Bolaños, E.¹, Lezama, E.¹, ¹Acuña, I.¹, Vega, G.Y.¹, Mondragón,
J.A.¹,

Escuela Superior de Tizayuca Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Tizayuca
Hidalgo 43800, México.

soliser@uaeh.edu.mx

sandrahm@uaeh.edu.mx

ebolanos@uaeh.edu.mx

evangel@uaeh.edu.mx

israel_acuna4738@uaeh.edu.mx

gaby@uaeh.edu.mx

jose_mondragon@uaeh.edu.mx

1. Resumen

El presente trabajo de investigación se centra en el proceso de acreditación del programa educativo de la Licenciatura en Tecnologías de Información (LTI) sometido al proceso de evaluación, en el periodo 2017-2022, por el Comité Interinstitucional de Evaluación de la Educación Superior (CIEES), a través del Comité de Ciencias Naturales y Exactas, realizado por la metodología establecida en la Guía para la Autoevaluación de Programas de Educación Superior (GAPES), conformada por ejes, categorías e indicadores y que dan respuesta a las necesidades sociales, tecnológicas, de la profesión y del mercado laboral. Las principales conclusiones obtenidas muestran el cumplimiento de los estándares de calidad y la mejora continua para el fortalecimiento de la carrera en cuestión a corto, mediano y largo plazo mediante acciones y estrategias que inciden en las áreas de oportunidades detectadas.

2. Introducción

En la actualidad en México existen diversos organismos certificadores de la calidad educativa de los programas educativos de nivel superior entre los que destaca, CIEES y el Consejo para la Acreditación para la Educación Superior (COPAES), los cuales buscan reconocimiento oficial y formal en instituciones públicas y privadas apegadas a estándares de calidad.

La evaluación de un programa educativo ante un organismo certificador nacional es de suma importancia por varias razones, en primer lugar, la certificación y/o acreditación demuestra que el programa cumple con estándares y requisitos de calidad reconocidos a nivel nacional, esto brinda credibilidad y confianza, así mismo el proceso de evaluación y acreditación ayuda al programa educativo a identificar áreas de mejora y a implementar procesos más robustos para garantizar la calidad de manera sostenida, esto se traduce en una mejor atención, mayor eficiencia y menores riesgos para los usuarios finales.

Entre las ventajas de evaluación de un programa educativo de calidad se destaca que la certificación y/o acreditación proporciona una garantía de que los procesos y servicios de la organización son confiables y eficaces, lo que es fundamental para establecer relaciones de confianza entre los involucrados en este proceso, así mismo garantiza que los resultados de la evaluación sean

comparables y reproducibles, lo que es fundamental para establecer estándares de calidad para evaluar el desempeño de la institución en el tiempo^[1].

Por lo anteriormente expuesto, este trabajo de investigación tiene como objetivo general: analizar el proceso de evaluación de la LTI de la Escuela Superior de Tizayuca (ESTi) dependiente de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), incluyendo sus propósitos, fundamentación, condiciones generales de operación y evidencias de su calidad y eficacia a través de un enfoque de investigación mixto para dar cumplimiento de los estándares de calidad educativa.

3. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se identifica un enfoque metodológico mixto que combina métodos cuantitativos y cualitativos, donde el diseño es no experimental debido a que se investiga el objeto de estudio tal cual como sucede en la realidad, además de tipo transversal, ya que se recolectarán los datos en un momento único sin manipular las variables independientes^[2].

Este trabajo se desarrolla por un cuerpo colegiado de investigación que forma parte de la plantilla docente del programa educativo mediante estrategias colaborativas y cooperativas en la búsqueda de la información requerida y las evidencias que los sustentan a través de la aplicación de un instrumento de recolección de datos basados en la Guía de Autoevaluación de Programas Educativos de Educación Superior^[3].

La GAPES está estructurada en: Cinco ejes, 12 categorías y 49 indicadores, los cuales dan respuesta a las necesidades sociales, tecnológicas, de la profesión y del mercado laboral.

4. Resultados y discusión

A partir del análisis de las 12 categorías, se obtienen los siguientes resultados, los cuales se describen por cada una de ellas

Categoría 1: Propósitos del programa

Fortalezas

- La misión, visión y objetivos del Programa Educativo son congruentes entre sí dando pauta a un plan de estudios adecuado para la formación integral de los estudiantes en concordancia con lo que dicta el Modelo Educativo de la UAEH.
- El Programa Educativo de la LTI cuenta con una fundamentación sólida que responde a las necesidades de la sociedad y del mercado laboral.
- El Programa Educativo de la LTI está diseñado de tal manera que se asegura el cumplimiento del perfil de egreso.

- Las metas y estrategias para el aseguramiento de la calidad del Programa Educativo de la LTI están en absoluta concordancia con el Plan de Desarrollo Institucional^{[4],[5]}.

Problemáticas detectadas

- Dentro de los propósitos del Programa Educativo, como tal no se visualizan problemáticas. Sin embargo, como parte de las acciones de seguimiento y verificación, se estará monitoreando el cabal cumplimiento de los propósitos en el quehacer cotidiano dentro del Programa^{[4],[5]}.

Categoría 2: Condiciones generales de operación del programa

Fortalezas

- Se cuenta con una estructura organizacional establecida la cual es dispuesta por directivos de la ESTi, para la atención de las necesidades del Programa Educativo de LTI y hasta el momento es adecuada para cubrir con las actividades y necesidades del PE.
- El Programa Educativo de la LTI se encuentra debidamente registrado ante la Dirección General de Profesiones dando certeza del respeto a la legalidad con la que se conduce la Institución.
- El marco normativo institucional coadyuva a que los estudiantes, académicos y administrativos de la UAEH, en general, y de la LTI, en particular, estén conscientes de sus derechos como individuos y como alumnos, y de sus correspondientes obligaciones tanto éticas como académicas. Esto permite la convivencia sana para lograr una educación de calidad.
- La difusión de la normativa institucional es adecuada y suficiente lo que permite a la comunidad universitaria en general consultarla en todo momento.
- En general, el ambiente académico prevaleciente dentro de la LTI es de respeto, tolerancia y participación.
- Existe un adecuado equilibrio entre la asignación de recursos, infraestructura y matrícula con la que cuenta el Programa.

Problemáticas detectadas

- Se considera importante nivelar la matrícula de primer ingreso, por lo que como estrategia principal el programa educativo se encuentra reforzando la difusión en las escuelas de nivel medio superior ubicadas dentro de la región de impacto de la ESTi y una vez que los alumnos forman parte de la Licenciatura.

Categoría 3: Modelo educativo y plan de estudios

Fortalezas

- La operación del Programa Educativo se lleva a cabo en congruencia con el Modelo Educativo de la institución, lo que permite formar profesionistas bajo un enfoque de enseñanza y aprendizaje que se alinean al plan estratégico de la institución.
- El modelo educativo incorpora las competencias como dispositivo pedagógico, es decir, se consideran en los niveles de las competencias genéricas y específicas en el diseño curricular.
- Los objetivos de cada asignatura contribuyen a alcanzar el perfil de egreso.
- Las asignaturas son revisadas y actualizadas a través de las Academias Disciplinarias, con lo que se logra una mayor congruencia con el ámbito laboral y los estándares nacionales e internacionales vigentes.
- El uso de la herramienta Syllabus ha permitido contar de manera oportuna con la información referente al avance programático y las calificaciones de los estudiantes^[6].

Problemáticas detectadas

- Debido a que no hay seriación de algunas asignaturas, los estudiantes pueden cursarlas en un orden no conveniente y tener problemas para acreditarlas^[6].

Categoría 4: Actividades para la formación integral

Fortalezas

- La Universidad tiene los mecanismos suficientes para brindar a sus estudiantes la atención adecuada durante su estancia en la institución, así como para el fortalecimiento de su formación integral, por lo que ha implementado diversos programas institucionales, entre ellos se encuentran el Programa de Actividades de Innovación Educativa para el Alumnado, Programa Institucional de Actividades de Educación para una Vida Saludable, Actividades Artísticas y Culturales y el Programa Institucional de Lenguas. Además, de las asignaturas institucionales de Aprender a Aprender, México Multicultural, Fundamentos de Metodología de la Investigación, así como Desarrollo Sustentable y del Medio Ambiente.

Problemáticas detectadas

- No se encontraron problemáticas relacionadas con la categoría número 4.

Categoría 5: Proceso de ingreso

Fortalezas

- Se tienen establecidas una gran variedad de estrategias de difusión y promoción del programa entre los potenciales aspirantes mediante medios tradicionales y digitales las cuales permiten tener una mayor cobertura y dar a conocer aspectos relevantes del programa.
- Se garantiza equidad en el proceso de ingreso al programa educativo al tener apego y estricto cumplimiento a la legislación universitaria donde se establecen la equidad y la transparencia como obligatorios.
- El proceso de ingreso es transparente debido a que el diseño, aplicación y resultados están a cargo del organismo externo CENEVAL.
- Previo al inicio del semestre, se llevan a cabo cursos de inducción para los alumnos de primer semestre, con el propósito de que se familiaricen con la operación básica del PE y vida universitaria.
- Con la finalidad de nivelar a los alumnos de nuevo ingreso, se aplican cursos de homologación durante una semana.
- Como parte de la nivelación de alumnos, se encuentra consolidado el Programa Institucional de Tutorías y Asesorías debido a que el 100% de los estudiantes que requieren algún tipo de apoyo o regularización para su trayectoria exitosa por el programa educativo son atendidos.
- Se cuenta con un proceso ágil, rápido y transparente de revalidación de estudios que se encuentra establecido en el Reglamento propio de nuestra institución, donde se especifican procedimientos académicos y administrativos para llevarlo a cabo.

Problemáticas detectadas

- No todos los alumnos aceptados e inscritos participan en el Programa de Homologación establecido en el programa educativo al iniciar el primer semestre porque en la mayoría de los casos no han concluido sus estudios de nivel medio superior en las instituciones de procedencia; motivo por el que, el programa educativo tiene como estrategia a corto y mediano plazo para subsanar esta situación realizar cursos de homologación en modalidad híbrida (presencial y a distancia) para que el estudiante que no pueda asistir de forma física a las instalaciones de la escuela tenga la opción de realizar el curso en línea.

Categoría 6: Trayectoria escolar

- El 100% de la matrícula de los estudiantes del Programa Educativo tienen un profesor tutor asignado.
- El 100% de la matrícula de los estudiantes del Programa Educativo pueden solicitar o ser canalizados para la realización de asesorías académicas en cualquier periodo del ciclo escolar.
- Se han realizado visitas guiadas externas a instalaciones del sector empleador del programa educativo que fortalecen el vínculo de la teoría con la práctica.
- Existen precedentes de trabajos colegiados y colaboración con pares académicos con centros de investigación y universidades donde los estudiantes pueden hacer visitas y estancias de investigación.
- Existencia de un catálogo de empresas donde los estudiantes pueden realizar sus prácticas profesionales^{[7],[8]}.

Problemáticas detectadas

- Los profesores por asignatura que realizan las funciones de tutorías y asesorías académicas se ven limitados a espacios como el aula de clases y la biblioteca para llevar a cabo dichas actividades, ante esto se han implementado acciones para atender los espacios.
- Proceso burocrático y lento para la firma de convenios con organizaciones del ámbito productivo, académico y de investigación, en donde se mantiene comunicación con la dependencia correspondiente.
- El alumnado no cuenta con los recursos económicos necesarios para realizar movilidad nacional o internacional, porque los apoyos brindados no cubren la totalidad de los gastos^{[7]. [8]}.

Categoría 7: Egreso del programa

Fortalezas

- La normativa clara para los procesos de titulación, así como la existencia de una diversidad de modalidades por las que los estudiantes pueden optar, en beneficio de su formación, así como de sus tiempos y recursos.
- La difusión de dichos procesos y modalidades de titulación, que permiten al egresado conocer con antelación lo que debe realizar y el tiempo que tiene para cumplir su proceso sin contratiempos.
- Se cuenta con un proceso de seguimiento establecido que permite evidenciar el desarrollo de las actividades de los estudiantes en el servicio social y las prácticas profesionales.
- El programa educativo de la LTI involucra en diversas actividades a sus egresados y da seguimiento puntual de la trayectoria laboral lo que permite la consolidación de una identidad institucional.

Problemáticas detectadas

- La complejidad de algunas asignaturas origina rezago educativo y por ello deciden abandonar el programa educativo.
- La mayoría de los estudiantes lo hace por situaciones de índole personal y económico.
- Percepción social de que no ha cumplido con las expectativas académicas, lo que genera estigma y presión social.

Categoría 8: Resultados de los estudiantes

Fortalezas

- El cumplimiento del perfil de egreso es corroborado mediante la aplicación de un examen por un organismo interno, en este caso el Examen General de Egreso Institucional.

- Los estudiantes del programa educativo muestran que tienen el dominio del idioma inglés al ser certificados con nivel B1.
- La participación de los alumnos en diversos eventos y competencias da visibilidad al programa educativo y a la universidad fuera de esta.
- El programa educativo tiene una serie de mecanismos los cuales permiten evaluar el aprendizaje de los alumnos durante su formación, y permite tomar las acciones adecuadas en caso de identificar un área de oportunidad en la formación de estos.

Problemáticas detectadas

- Es necesario continuar fomentando la participación de los estudiantes en eventos externos.
- La cantidad de sustentantes que aprueban el examen EGEL Institucional no es precisamente baja, pero es deseable que sea incrementada.

Categoría 9: Resultados del programa

Fortalezas

- Se cuenta con un estudio de seguimiento de egresados que permite tomar decisiones que benefician al PE.
- Los egresados que han conseguido empleo (61.5%) lo han hecho en un tiempo promedio de dos a tres meses.
- De forma general, la actividad laboral de los egresados coincide con lo aprendido en el programa educativo.
- Los egresados están satisfechos con la formación que recibieron.
- Se tienen y aplican diversas estrategias para incrementar la eficiencia terminal y la eficiencia en la titulación.
- Se tienen identificadas las causas de deserción y se aplican acciones que funcionan para disminuirla.

Problemáticas detectadas

- Debido a la reciente creación del programa educativo, por el momento los resultados obtenidos con relación a eficiencia terminal y eficiencia en la titulación con relación al ingreso y egreso son bajos, por lo que con la finalidad de que a futuro se logre resultados óptimos, se está trabajando en la aplicación de diversas estrategias como la preparación de los alumnos previo a la aplicación del EGEL, así como la preparación de una evaluación progresiva a los alumnos del PE.

Categoría 10. Personal académico

Fortalezas

- La planta académica es vasta y versátil.
- Se promueve la investigación entre los estudiantes del programa ya que todos participan en el desarrollo de algún proyecto terminal al final de su estancia en el programa. Derivados de estos proyectos se tienen presentaciones ante comités con lo cual los estudiantes fortalecen la competencia de comunicación oral y escrita.
- La Evaluación Docente representa una fortaleza pues promueve el mejoramiento del profesorado ya que valida aspectos de formación, desempeño, actitud y calidad.
- Existe una buena participación de los docentes en los cursos de habilitación académica que ofrece DiSA.

Problemáticas detectadas

- Incrementar la planta docente de tiempo completo para reforzar la atención personalizada a la matrícula del programa, ante gestiones con la dependencia correspondiente.
- Acrecentar participación de la planta docente en estudios de posgrado, a partir de realizar difusión de ellos con los docentes.
- Aumentar participación de la planta docente en cursos externos (MOOC, Webinar, Talleres, etc.), de manera que se realizan acciones para invitarlo.

Categoría 11: Infraestructura académica

Fortalezas

- Los laboratorios son pieza fundamental para cualquier PE que contenga aspectos teóricos - prácticos, por ende, para la LTI es una fortaleza poder llevar a cabo actividades donde los alumnos puedan practicar y generar retroalimentación con base en prueba y error, pues cuando lleguen a la práctica profesional deberán conocer los instrumentos que utilizarán.
- El laboratorio de electrónica cuenta con equipo de medición, herramientas, consumibles de electrónica, lo cual es muy estimulante para los estudiantes usar en sus unidades de aprendizaje.
- La biblioteca cuenta con base de datos electrónicas que dan apoyo al PE.

Problemáticas detectadas

- Con respecto a la infraestructura académica se han atendido los requerimientos de apoyo al programa educativo de la LTI por lo que no se ha identificado alguna necesidad prioritaria que subsanar actualmente.

Categoría 12: Servicios de apoyo

Fortalezas

- Los servicios que se ofrecen a los estudiantes a través de la Dirección de Administración Escolar se encuentran sistematizados y con acceso permanente y disponibilidad desde cualquier dispositivo y/o equipo de cómputo; los estudiantes con su número de cuenta y NIP institucional mantienen accesibilidad a las aplicaciones que les permiten realizar los trámites administrativos necesarios.
- La atención personalizada de servicios de atención y prevención psicológica, asesorías y tutorías que permiten asegurar el bienestar estudiantil.
- Las distintas becas otorgadas a estudiantes que permiten subsanar algunas necesidades.
- El transporte a través del Garza Bus, medio oficial disponible que ofrece opciones de traslado a la comunidad estudiantil.
- Contar con espacios para la alimentación dentro de la institución representa una alternativa económica y saludable para el desarrollo de los estudiantes.

Problemáticas detectadas

- Se cuenta con un número limitado de becas otorgadas que provienen de fondos federales, aunque el programa educativo dispone de un proceso sistematizado de seguimiento de alumnos becados y aspirantes a becas, el número de beneficiarios sigue siendo menor, en comparación con el número total de solicitudes realizadas en cada convocatoria.
- El transporte universitario logra brindar atención a una cuarta parte de la población estudiantil.
- El servicio de cafetería institucional al estar concesionado no brinda apoyos alimenticios para el alumnado, pero se cuenta con el apoyo de becas que permite subsanar necesidades, el servicio disponible logra atender a un diez por ciento de la comunidad estudiantil.

5. Conclusiones

Los resultados del análisis del proceso de evaluación dan apertura para conocer y diagnosticar las fortalezas que representa la fundamentación y condiciones de operación del programa, currículo específico y genérico, tránsito de los estudiantes por el programa, resultados y personal académico, infraestructura y servicios de apoyo, de la misma forma permite detectar las problemáticas y áreas de oportunidad del programa educativo que pueden ser atendidas a corto, mediano y largo plazo dando cumplimiento de los estándares de calidad y la mejora continua para el fortalecimiento de la LTI.

6. Bibliografía

[1] Zayas I., Evaluación de la Licenciatura en Administración y Gestión de Pequeñas y Medianas Empresas por CIEES: gestión de innovación en la UPVE, RIDE. Rev. Iberoam. Investig. Desarro. Educ. V.11, (2021).

[2] Hernández R., Fernández C., Baptista P., "Metodología de la Investigación", Capítulo 1, El Proceso de investigación y los enfoques cuantitativos y cualitativos hacia un modelo integral, 2023.

[3] Proceso general para la evaluación y acreditación de programas educativos de educación superior, <https://www.ciees.edu.mx/documentos/Proceso-General-para-la-Evaluacion-y-Acreditacion-de-Programas-Educativos-de-Educacion-Superior.pdf>

[4] Indicador Trimestral de la Actividad Económica Estatal de Hidalgo, Tercer Trimestre de 2022, https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/itaee/itaee2023_01_Hgo.pdf

[5] Estudios y publicaciones del Observatorio Laboral, <https://www.observatoriolaboral.gob.mx/>

[6] Modelo Educativo de la UAEH, https://www.uaeh.edu.mx/modelo_educativo/docs/triptico_final_corregido.pdf

[7] Programa Institucional de Tutorías, <https://www.uaeh.edu.mx/tutorias/programas/tutorias/documentos/2023/programa-institucional-tutorias-23.pdf>

[8] Programa Institucional de Asesorías, <https://www.uaeh.edu.mx/tutorias/programas/asesorias-academicas/documentos/programa-institucional-de-asesorias-academicas-2019.pdf>

Modelamiento y Predicción del Valor de Activos en el mercado de las Principales Criptomonedas, utilizando Redes LSTM, Máquinas de Soporte Vectorial y Arima.

Jiménez-Carrión, M¹, Flores-Fernandez, G. A²

¹ Professor, Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Piura, Castilla-Piura, Perú. mjimenezc@unp.edu.pe, Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9632-5085>.

² Egresado de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Piura, Perú. fgustavoalexis@gmail.com, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4488-4325>.

1. Resumen

En este trabajo se planteó como objetivo diseñar herramientas algorítmicas de alto performance, para obtener predicciones confiables en las principales criptomonedas, que coadyuven a los agentes económicos a invertir en activos rentables. Para tal efecto la metodología inicia con un análisis exploratorio de datos, seguido de una evaluación comparativa de diversos métodos de predicción mediante sus métricas de regresión y termina con un análisis experimental de la estabilidad de los

algoritmos; los resultados mostraron que las redes neuronales recurrentes del tipo LSTM, supera a las máquinas de soporte vectorial y al modelo autorregresivo integrado de promedio móvil, como se puede apreciar en la métrica RMSE donde las redes LSTM obtiene el menor valor con \$1,278.91 en comparación a los otros dos métodos que obtuvieron \$4939.79 y \$17,782.73; similar comportamiento se observó en la métrica MAPE. Finalmente, el coeficiente de determinación (R^2) en todas las criptomonedas fue superior al 93%, demostrando una alta precisión predictiva.

2. Introducción

Las tecnologías que ayudan a mejorar eficientemente el uso de recursos monetarios dentro de las unidades productoras han ido mejorando, así también en algunos casos se han presentado nuevas tecnologías como el uso del blockchain que viene siendo en los últimos años una alternativa financiera atractiva debido a la representación de valor activos en relación a una nueva tecnología ofertada en el mercado de criptomonedas. Estas tecnologías están al alcance no solo de unidades productoras que buscan un refugio financiero, sino también de las personas naturales en general. Desde la aparición del Bitcoin, que es la moneda virtual basada en blockchain más conocida y que genera un mayor volumen monetario, han ido surgiendo más tecnologías cuyo valor monetario puede ser atractivo dependiendo del comportamiento que tenga, esto de forma análoga a lo que se conoce como mercado de valores en activos de capital. Por lo tanto, escoger eficientemente el conjunto de monedas de activos de capital que tengan un comportamiento atractivo para los posibles inversores es una tarea alta complejidad desde el punto de vista relacionado a la mejor y más eficiente predicción del valor del activo en un periodo de tiempo determinado y que genere la mayor rentabilidad para el inversor. En este escenario, se planteó la presente investigación con el objetivo de hacer un análisis comparativo de las diferentes herramientas utilizadas más relevantes y proponer una herramienta que de acuerdo a las métricas de eficiencia sea la mejor. Dentro de las cuales se planteó una red neuronal artificial de tipo Long Short-Term Memory [LSTM] de naturaleza multistep, máquinas de soporte vectorial y Arima, además determinar el impacto que tiene las menciones y sentimientos expresados en la red social Twitter.

Las criptomonedas están adquiriendo cada vez más relevancia en el mundo financiero y pueden considerarse como un mercado emergente. La baja barrera de entrada y la alta disponibilidad de datos del mercado de las criptomonedas lo convierten en un excelente tema de estudio, del cual es posible obtener información sobre el comportamiento de los mercados mediante la aplicación de análisis de sentimiento y técnicas de aprendizaje automático para la desafiante tarea de las acciones de predicción del mercado. Si bien ha habido algunos estudios previos, la mayoría de ellos se han centrado exclusivamente en el comportamiento de Bitcoin. Sobre el particular Valencia^[1], en su trabajo proponen el uso de herramientas comunes de aprendizaje automático y datos de redes sociales disponibles para predecir el movimiento de precios de los movimientos del mercado de criptomonedas Bitcoin, Ethereum, Ripple y Litecoin y compararon la utilización de redes neuronales (NN), máquinas de vectores de soporte (SVM) y bosques aleatorios (RF) y utilizaron elementos de Twitter y datos de mercado como características de entrada. Sus resultados muestran que es posible predecir los mercados de criptomonedas utilizando el aprendizaje automático y el análisis de sentimientos, donde

los datos de Twitter por sí solos podrían usarse para predecir ciertas criptomonedas y que NN supera a los otros modelos.

Por otro lado, el modelamiento y predicción de series temporales constituye una tarea ardua y esencial para los procedimientos de optimización financiera. Numerosos estudios han sido elaborados con la finalidad de reducir la incertidumbre del inversor, mediante el pronóstico de precio de monedas y acciones. Sin embargo, el surgimiento de un nuevo tipo de monedas, conocidas como criptomonedas, plantea retos adicionales, que hacen sospechar que las publicaciones en redes sociales pueden capturar las expectativas colectivas de los inversores, y afectar el valor futuro de la moneda. En ese sentido Regal^[2], se plantearon como objetivo pronosticar el desempeño diario de un mercado en base a dos componentes: aquellos que definen el comportamiento de la criptomoneda en sí (volumen, valor de apertura, valor de cierre, valor máximo y valor mínimo) y las expectativas e interacciones del entorno, obtenidas de los tweets recolectados; por tanto, propusieron el uso de un tipo de red neuronal recurrente conocida como "Long Short Term Memory" (LSTM) y sostienen que la metodología empleada para el preprocesamiento de los datos y la aplicación de esta técnica de pronóstico de series temporales les permitió obtener una predicción con un MAPE de 34.92%; lo que indica que la representación de la variable de percepción en redes social no ha sido la pertinente y, por lo tanto, motiva nuevos trabajos con la finalidad de modelar esta variable mediante el uso de otras técnicas de NLP.

Por su parte Yang^[3], manifiestan que los precios de las criptomonedas tienen la característica de alta volatilidad, lo que tiene una resistencia específica a la predicción del precio

de las criptomonedas. Por lo tanto, el método adecuado de predicción del precio de las criptomonedas puede ayudar a reducir el riesgo de inversión de los inversores. En su estudio, propusieron un método de predicción novedoso utilizando un modelo gris fraccionario (FGM (1,1)) para predecir el precio de la criptomoneda blockchain. En concreto, este estudio estableció el FGM (1,1) a través del precio de cierre de tres criptomonedas blockchain más representativas (Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH) y Litecoin (LTC)). Adoptaron el algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) para optimizar y obtener el orden óptimo del modelo, realizando así su investigación de predicción sobre el precio de la criptomoneda blockchain. Para verificar la precisión predictiva de FGM (1,1), usaron las métricas MAPE, MAE y RMSE como criterios de evaluación y compararon la precisión predictiva del modelo con GM (1,1) a través de experimentos. Los resultados de su investigación indican que, dentro del rango de datos estudiado, la precisión predictiva del FGM (1,1) en el precio de cierre de BTC, ETH y LTC ha alcanzado un nivel "altamente preciso". Además, a diferencia del GM (1,1), el FGM (1,1) supera la capacidad predictiva en los experimentos. Esta investigación proporcionó un nuevo método factible para la predicción de precios de criptomonedas blockchain.

Las criptomonedas son activos de inversión muy volátiles y difíciles de predecir. En este estudio, los autores utilizan varios datos de criptomonedas como características para predecir el precio de retorno logarítmico de las principales criptomonedas. La contribución original de este estudio es la selección de las características principales más influyentes para cada criptomoneda utilizando las características de volatilidad de la criptomoneda, derivadas de los modelos de heterocedasticidad condicional autorregresiva (ARCH) y heterocedasticidad condicional autorregresiva generalizada (GARCH), junto con el precio de cierre de la criptomoneda. Además, buscan predecir el precio de

rendimiento logarítmico de las criptomonedas mediante la implementación de varios tipos de modelos de series temporales. Con base en las características principales seleccionadas, el precio de retorno logarítmico de la criptomoneda se predijo mediante el modelo de predicción de series de tiempo de promedio móvil integrado autorregresivo (ARIMA) y el modelo de predicción de series de tiempo basado en redes neuronales artificiales. Como resultado de la predicción de precios de rendimiento logarítmico, los modelos de predicción de series temporales basados en redes neuronales mostraron un poder predictivo superior en comparación con el modelo tradicional de predicción de series temporales^[4]

Pasak y Jayadi^[5] se plantearon predecir los precios de 5 criptomonedas (Bitcoin, Ethereum, Tether, Binance coin, y Cardano) y con ello proveer de información a profesionales del sector financiero u otros grupos de interés; para tal efecto extrajeron datos del sitio web Yahoo Finance, a los cuales se les aplicó una limpieza para eliminar valores faltantes además que fueron visualizados para poder identificar patrones y tendencias, luego se decidió aplicar y comparar a través de 2 métricas de regresión (MAPE y RMSE) el rendimiento predictivo del Modelo ARIMA y redes neuronales recurrentes LSTM. Para el modelo ARIMA se consideró la prueba Dickey-Fuller aumentada (ADF) para verificar la estacionariedad de la serie y el criterio de información de Akaike (AIC) para determinar los mejores valores de (p, d, q); para las redes LSTM fue utilizado el optimizador Adam. Los resultados de esta investigación arrojaron que para las 5 criptomonedas (Bitcoin, Ethereum, Tether, Binance coin, y Cardano) el modelo ARIMA obtuvo un MAPE de 6.9, 14.1, 1806.8, 28.5 y 763.6% respectivamente mientras que las redes LSTM obtuvieron un MAPE de 5.2, 5.6, 0.1, 9.9 y 6.5% respectivamente con lo que evidencian que las redes LSTM tienen un rendimiento superior al modelo ARIMA con un MAPE menor al 10% en los 5 casos. Los autores concluyen que Las redes LSTM tiene mejor rendimiento debido a que el modelo ARIMA a pesar de capturar eficazmente la volatilidad, tendencia y estacionalidad, presenta problemas para identificar patrones complejos en los datos.

Del mismo modo Yu^[6], se propuso determinar entre los modelos media móvil (MA), regresión logística (LR), modelo ARIMA, redes LSTM y un modelo híbrido de red convolucional y LSTM (CNN – LSTM), cual es más preciso en la predicción de precios de 3 criptomonedas (Bitcoin, Litecoin, Ethereum). Para este estudio se consideraron datos sobre el precio de las 3 criptomonedas en el periodo entre 01/01/2018 y 31/05/2023, dichos datos fueron preprocesados utilizando el método de normalización Min-Max. El rendimiento de los modelos fue evaluado con las métricas de desempeño: MAPE, RMSE Y RMAE. Los resultados mostraron que los modelos MA, LR, ARIMA, LSTM y CNN-LSTM respecto al Bitcoin obtuvieron un MAPE de 705.95, 152.53, 210.76, 6.20 y 4.66% respectivamente; respecto al Litecoin el MAPE fue de 1041.97, 218,13, 98.40, 7.98 y 5.00% y respecto al Ethereum el MAPE fue de 603.96, 102.09, 62.15, 6.43 y 4.23%; concluyéndose que los modelos MA, LR y ARIMA presentan deficiencias para captar cambios y tendencias reales en las series de tiempo mientras que las redes LSTM y CNN – LSTM son capaces de captar relaciones no lineales, patrones complejos y dependencias a largo plazo.

Con relación a las máquinas de soporte vectorial Hudnurkar et al.^[7], en su investigación manifiesta recientemente, el uso de técnicas de aprendizaje automático para pronosticar los precios del mercado de valores se ha vuelto popular; sin embargo, el enfoque reciente se ha desplazado hacia el valor del nuevo activo digital, la criptomoneda. Es una moneda virtual o digital utilizada en el sistema financiero. Este paper tiene como objetivo construir un robot comercial algorítmico que pueda

pronosticar (pronóstico de series temporales) el precio de las acciones más preciso e intentar predecir los precios de las criptomonedas. Para realizar previsiones se ponen en práctica varias técnicas de aprendizaje automático, como la regresión de vectores de soporte (SVR), la red de memoria a corto plazo (LSTM) y la media móvil integrado autorregresiva (ARIMA). Este estudio ha adquirido provisionalmente un resultado efectivo, con una precisión de predicción de precios de las acciones seleccionadas que oscila entre el 92% y el 99% y las criptomonedas que oscilan entre el 80% y el 85%.

3. Condiciones experimentales

3.1 Información preliminar

Se consideraron 12 criptomonedas con la mayor capitalización del mercado de criptodivisas, cuya data diaria fue descargada de la plataforma es.investing.com, esta data se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Datos históricos de criptomonedas

Criptomoneda	Fecha inicial de datos	Fecha final de datos	Cantidad de datos
Bitcoin	18/07/2010	11/07/2024	5108
Ethereum	10/03/2016	11/07/2024	3046
Polkadot	08/02/2021	11/07/2024	1250
Shiba Inu	12/05/2021	11/07/2024	1157
BNB	09/11/2017	11/07/2024	2437
Avalanche	03/01/2021	11/07/2024	1286
TRX	13/06/2018	11/07/2024	2221
Dogecoin	03/06/2017	11/07/2024	2596
Cardano	31/12/2017	11/07/2024	2385
XRP	22/01/2015	11/07/2024	3458
Solana	13/07/2020	11/07/2024	1453
Litecoin	24/08/2016	11/07/2024	2879

La plataforma proporcionó datos sobre 6 variables relacionadas con el precio de las criptomonedas, como se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Variables relacionadas a las criptomonedas

Último	Último precio de la criptomoneda
Apertura	Precio inicial de la criptomoneda
Máximo	Valor máximo del precio de la criptomoneda
Mínimo	Valor mínimo del precio de la criptomoneda
Volumen	Volumen diario en valor monetario de las transacciones de la criptomoneda
% de variación	Variabilidad de la criptomoneda

3.2 Análisis exploratorio

3.2.1 Tratamiento de datos faltantes

Se procedió a identificar los datos faltantes para cada una de las criptomonedas en relación a sus 6 características. El resumen se muestra en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3. Porcentaje de datos faltantes

Criptomoneda	Porcentaje de datos faltantes					
	Último	Apertura	Máximo	Mínimo	Volumen	% Var.
Bitcoin	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.12002%	0.0%
Ethereum	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Polkadot	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	17.36000%	0.0%
Shiba Inu	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
BNB	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4103%	0.0%
Avalanche	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	19.67341%	0.0%
TRX	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Dogecoin	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.03852%	0.0%
Cardano	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.20964%	0.0%
XRP	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.75477%	0.0%
Solana	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	27.39160%	0.0%
Litecoin	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tal como se puede observar solo 3 criptomonedas presentaron más del 15% de datos faltantes en su característica volumen de capitalización. Esto se tuvo en cuenta en el entrenamiento del modelo multivariado de la red LSTM, incluyendo o excluyendo este parámetro para identificar el comportamiento de las métricas de desempeño. Para la imputación de datos se consideró el método de K-Vecinos (k=3) teniendo en cuenta que los métodos convencionales como imputación por media o mediana pueden sesgar el comportamiento del precio de la criptomoneda a usar un dato que puede estar lejos del valor máximo o mínimo considerando el rango del precio de las criptomonedas, así también el método de interpolación sea lineal, cuadrática o cubica no son adecuados al tener grandes rangos de valores vacío como se pudo observar en el data set. Con respecto a los outliers, siendo las criptomonedas un tipo de activo altamente volátil por la especulación, no se considera hacer una actualización de datos mediante métodos de tratamientos de datos anómalos ya que su naturaleza contempla muchos datos anómalos propios de este tipo de activos.

3.3 Modelos algorítmicos a utilizar

3.3.1 Redes LSTM

El modelo matemático de esta Red según Goodfellow et al., [8]

$$f_i^{(t)} = \sigma \left(b_i^f + \sum_j U_{i,j}^f x_j^{(t)} + \sum_j W_{i,j}^f h_j^{(t-1)} \right)$$

Donde:

$f_i^{(t)}$: Valor de la puerta de olvido para la celda i en el tiempo t

σ : Función sigmoide.

b_i^f : Sesgo para la puerta de olvido de la celda i .

$U_{i,j}^f$: Peso de la entrada x_j para la puerta de olvido de la celda i .

$W_{i,j}^f$: Peso de la salida oculta h_j para la puerta de olvido de la celda i .

$x^{(t)}$: Vector de entrada en el tiempo t .

$h^{(t-1)}$: Vector de estados ocultos en el tiempo $t - 1$

3.3.2 Máquina de soporte vectorial

La función de regresión a encontrar es la siguiente:

$$f(x) = \langle w, \varphi(x) \rangle + b$$

Donde w es un vector de pesos, $\varphi(x)$ es la transformación de los datos al espacio de características y b es un sesgo.

El problema de optimización de las SVR se formula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \min_{w,b,\xi,\xi^*} \quad & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s. a.} \quad & y_i - \langle w, \varphi(x_i) \rangle - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ & \langle w, \varphi(x_i) \rangle + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ & \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{aligned}$$

3.3.3 Modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA)

El modelo general según Ariyo et al., ^[9] se representa mediante la siguiente ecuación:

$$Y_t^{(d)} = \phi_0 + \phi_1 * Y_{t-1}^{(d)} + \dots + \phi_p * Y_{t-p}^{(d)} + \varepsilon_t + \theta_1 * \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_p * \varepsilon_{t-p}$$

En donde el superíndice “(d)” denota las observaciones diferenciadas en el orden “d” para el cual la serie temporal es estacionaria.

3.4 Diseño de la RED LSTM Multipasos

Se realizaron dos enfoques, el primero usa como valor de predicción el valor final de la criptomoneda, es decir es un modelo univariado multipasos y el segundo utiliza las 6 características provistas de la plataforma investing, por lo que se categoriza como un modelo multivariado multistep; el pseudocódigo que se muestra representa el modelo de red LSTM en su tipo univariado multipasos:

```

1: Input: Librerías
2: Input: Variables de entrada (Último)
3: Input: Hiperparámetros
4: Output: Métricas de desempeño del algoritmo y Precio de criptomonedas
5: Data frame  $\leftarrow$  Valor de criptomonedas
6: tr, vl  $\leftarrow$  Set de entrenamiento y validación
7: function ESCALAMIENTO DE DATOS
8:     Set de entrenamiento escalado set  $\leftarrow$  MinMax Scaler(Set de entrenamiento)
9:     Set de validación escalado  $\leftarrow$  MinMax Scaler(Set de validación)
10: end function
11: function ENTRENAMIENTO DEL MODELO
12:     Model  $\leftarrow$  Secuencial
13: Model  $\leftarrow$  agregar capa LSTM
14: Model  $\leftarrow$  agregar capa Dense
15: end function
16: function METRICAS DE PERFORMANCE
17: RMSE, MAE, MAPE, R2  $\leftarrow$  Performance del modelo
18: end function
19: Output: Métricas de performance del modelo y Precio de criptomonedas

```

Para lograr determinar los hiperparámetros que mejor desempeño tuvieron, se trabajó en el proceso de calibración logrando determinar algunos parámetros de manera constante como el número de capas de la red LSTM que fueron 3; y para los factores que demostraron influencia en las predicciones se hizo un diseño experimental de tipo factorial con los factores y niveles, que se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4. Factores y niveles del Diseño Factorial

Modelo LSTM			
Factores	Niveles		
Ratio de aprendizaje (A)	0.0009	0.00009	0.000009
Número de Épocas (B)	50	100	500
Tamaño de Lote (C)	40	70	150

La estabilidad del sistema en los resultados entregados se determina con un análisis de varianza usando la ecuación (1), con el fin de establecer si existen diferencias significativas en los resultados.

$$y_{ijkn} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + e_{ijkn} \quad (1)$$

$$i = 1,2,3; j = 1,2,3; k = 1,2,3; n = 1,2,3,4$$

En esta ecuación el parámetro y_{ijkn} representa la respuesta del Modelo predictivo expresada en las métricas: RMSE, MAE, MAPE, R^2 . De los datos de validación luego del aprendizaje. El análisis ANOVA mostrado en la tabla 5. Muestra los resultados experimentales y se observa una alta precisión respecto de la media.

Tabla 5. Anova de la Predicción de la criptomoneda BITCOIN

Factor	GL.	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	Sig.
A	2	6779550344.6180	3389775172.3090	8424.41592	**
B	2	265220894.4371	132610447.2185	329.56922	**
C	2	97333408.0292	48666704.0146	120.94860	**
AxB	4	4787210707.0698	1196802676.7674	2974.34579	**
AxC	4	842115016.1854	210528754.0463	523.21517	**
BxC	4	867726834.4468	216931708.6117	539.12807	**
AxBxC	8	3383172408	422896551.0176	1051.00081	**
Residual	81	32592382.8668	402375.0971		

CV =1.22%

Luego de haber encontrado alta significación en los 3 factores y sus interacciones se procedió a realizar la prueba de Duncan; usando la métrica MAPE, que cuantifica el error respecto a la predicción, conforme se muestra en la tabla 6.

Factor vs Nivel		RMSE		GL
Ratio de aprendizaje	0.0009	6,141.728	a	81
Ratio de aprendizaje	0.00009	7,045.902	b	81
Ratio de aprendizaje	0.000009	10,706.608	c	81
Factor vs Nivel				
Número de épocas	50	9,839.740	c	81
Número de épocas	100	8,728.849	b	81

Tabla 6. Duncan RMSE con	Número de épocas	500	5,325.649	a	81	Prueba de para el
	Factor vs Nivel					
	Tamaño de lote	40	7,283.825	a	81	
	Tamaño de lote	70	7,324.938	a	81	
	Tamaño de lote	150	8,406.793	b	81	
significancia 0.05						

La Tabla 6 muestra que en el factor Ratio de aprendizaje el Nivel 0.0009 es mejor estadísticamente que sus pares, en el factor Número de épocas, el nivel de 500 épocas es mejor que sus pares; finalmente en el factor tamaño de Lote los niveles 40 y 70 se comportan estadísticamente iguales.

4. Resultados y discusión

4.1. Resultados

Los resultados específicamente para la criptomoneda de referencia Bitcoin, luego de haber realizado el entrenamiento de la red LSTM, calibración del modelo ARIMA y procesamiento mediante máquina de soporte vectorial (MSV) se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Comparación de métricas entre algoritmos

Métrica	LSTM	MSV	ARIMA
RMSE	\$1,278.91	\$4,939.79	\$17,782.73
MAE	\$ 859.07	\$2,746.47	\$15,725.22
MAPE	2.31%	7.17%	57.42%
R ²	99.35%	90.29%	-25.80%

Esto también se puede evidenciar en el comportamiento de los datos predichos con los algoritmos con los datos reales tal como se muestra en la siguiente figura 1:

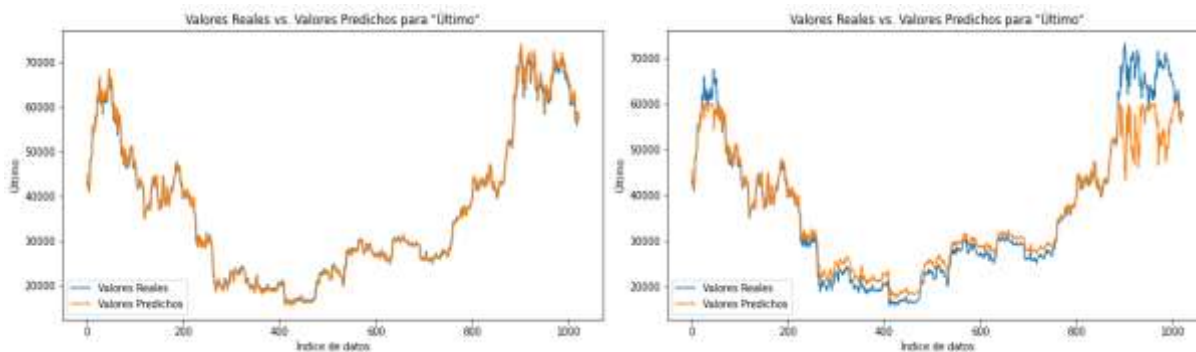




Figura 1. Comparación de modelos con datos predichos y reales: (a) LSTM, (b) MSV y c) ARIMA

Lo cual demuestra un desempeño más eficiente de la red LSTM en relación a los algoritmos SMV y ARIMA. Este mismo comportamiento se observa al hacer una extensión del análisis más allá del 11/07/2024, encontrándose que en la comparación analítica entre la predicción de 7 pasos siguientes al set de validación y los datos reales a la fecha 18/07/2024 para las 12 criptomonedas (ver tabla 8.), existe buenos resultados para la red LSTM; además mediante el análisis experimental se determinó que a pesar que el modelo univariado tuvo mejores métricas en un 75% de las criptomonedas, al efectuar las predicciones estas tuvieron menos variación respecto a los datos reales mediante el modelo univariado para todas las criptomonedas, por lo que los pequeños porcentajes de variación en donde el modelo multivariado presente mejores métricas son depreciables.

Tabla 8. Comparación de datos reales vs Predichos

Variación entre valores reales y predichos					
Criptomoneda	Promedio	Criptomoneda	Promedio	Criptomoneda	Promedio
Bitcoin	2.66%	BNB	6.68%	Solana	10.38%
Ethereum	5.44%	Dogecoin	8.59%	Litecoin	2.16%
Polkadot	2.69%	TRX	3.56%		
Shiba Inu	6.38%	Cardano	10.45%		
Avalanch	7.26%	XRP	17.57%		

Según lo mostrado en la tabla se tuvo una variación promedio entre mínimo de 2.16% y un valor máximo de 17.57% respecto al precio correspondiente a la característica último de las criptomonedas.

4.2. Discusión

La presente investigación ha evaluado y comparado distintos modelos de predicción de precios de criptomonedas, destacando la clara superioridad del modelo LSTM sobre los modelos de

Máquinas de Soporte Vectorial (MSV) y ARIMA. Este hallazgo es consistente con estudios previos, como el de Valencia ^[1], que también encontraron que las redes neuronales, superan a otros modelos en la predicción de precios de criptomonedas utilizando datos de Twitter y del mercado.

Para el modelo univariado, la configuración óptima LSTM demostró buenos resultados en el 75% de criptomonedas. En el modelo multivariado, una configuración similar con una capa LSTM adicional y solo 40 épocas de entrenamiento proporcionó en el 25% de criptomonedas mejores resultados en cuanto a las métricas, sin embargo, y en concordancia con los hallazgos de Regal ^[2] en donde también se usó un modelo multivariado se encontró que a nivel de predicción frente a datos reales nunca mostrados a la red LSTM multivariado, se encontró un desempeño poco eficiente con un MAPE superior al 30% para ambos casos.

Las métricas de error, como RMSE, MAE y MAPE, mostraron resultados favorables, indicando un buen ajuste y alta precisión del modelo LSTM. En promedio, el RMSE representó un coeficiente de variación de 6.343% respecto de la media del precio de las criptomonedas, mientras que el MAE y el MAPE tuvieron valores promedio de 4.129% y 2.745%, para el caso de esta última métrica presento una performance superior a los estudios de Pasak y Jayadi ^[5] y Yu ^[6], en donde obtuvieron un MAPE de 6.9% y 4.66% y al ser menor al 10% demuestra la potencia de las redes LSTM para predecir de forma eficiente el valor de las criptomonedas.

5. Conclusiones

El modelo predictivo univariado LSTM demostró tener un mejor desempeño en el 75% de las criptomonedas logrando mejores resultados que los modelos MSV y ARIMA en las cuatro métricas evaluadas; con la siguiente configuración: 500 unidades LSTM, 3 capas LSTM, una tasa de aprendizaje de 0.0009, 2 capas dropout con una tasa de dropout del 30%, un batch size de 70, 1 paso de entrada, 100 épocas y un 80% del conjunto de datos utilizado para el entrenamiento. El 25% restante de las criptomonedas alcanzaron mejores desempeños con un modelo multivariado y con la configuración de 500 unidades LSTM, 4 capas LSTM, una tasa de aprendizaje de 0.00009, 2 capas dropout con una tasa de dropout del 30%, un batch size de 70, 1 paso de entrada, 40 épocas y un 80% del conjunto de datos utilizado para el entrenamiento; en este caso Ethereum y Cardano, presentaron un mejor desempeño en todas las métricas con el modelo multivariado.

La métrica RMSE, en promedio, representó el 6.343% de la media del precio de las criptomonedas, mientras que para la desviación estándar representó, en promedio, un 6.597%. Estos resultados indican que un porcentaje menor al 7%, incluso en términos de desviación estándar, demuestra un buen ajuste de los valores predichos a los valores reales. La métrica MAE, en promedio, representó el 4.129% de la media del precio de las criptomonedas, mientras que para la desviación estándar representó, en promedio, un 4.274%. Esto indica que, en términos absolutos, la variación entre los valores predichos y los valores reales no supera el 5%, demostrando un buen desempeño de la red para predecir el valor de las criptomonedas. La métrica MAPE tuvo un valor promedio de 2.745%, lo que sugiere que, en términos porcentuales relativos, los errores son pequeños en relación con la media del valor de las criptomonedas. El coeficiente de determinación (R^2) para todos los casos tuvo un valor mayor al 93.02%, alcanzando un máximo de 99.35%. Esto indica que la variación del precio de las criptomonedas es explicada por sus variables (en el modelo multivariado) o por una

variable (en el modelo univariado) predictora en más del 90%, lo que demuestra un buen ajuste de la arquitectura para predecir el valor de las criptomonedas.

6. Bibliografía

1. Valencia, F., Gómez-Espinosa, A., & Valdés-Aguirre, B. (2019). Price Movement Prediction of Cryptocurrencies Using Sentiment Analysis and Machine Learning. *Entropy*, 21(6), 589-589. Academic Search Ultimate. <https://doi.org/10.3390/e21060589>
2. Regal, A., Morzán, J., Fabbri, C., Herrera, G., Yaulli, G., Palomino, A., & Gil, C. (2019). Proyección del precio de criptomonedas basado en Tweets empleando LSTM. *INGENIARE - Revista Chilena de Ingeniería*, 27(4), 696-706. Academic Search Ultimate.
3. Yang, Y., Xiong, J., Zhao, L., Wang, X., Hua, L., & Wu, L. (2023). A Novel Method of Blockchain Cryptocurrency Price Prediction Using Fractional Grey Model. *Fractal & Fractional*, 7(7), 547-565. Academic Search Ultimate. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7070547>
4. Sung, S.-H.; Kim, J.-M.; Park, B.-K.; Kim, S. A Study on Cryptocurrency Log-Return Price Prediction Using Multivariate Time-Series Model. *Axioms* 2022, 11, 448. <https://doi.org/10.3390/axioms11090448>
5. Pasak, S., & Jayadi, R. (2023). Investment decision on cryptocurrency: Comparing prediction performance using ARIMA and LSTM. *Journal of Information Systems and Informatics*, 5(2), 407–427.
6. Yu, S. (2024). Comparative analysis of machine learning techniques for cryptocurrency price prediction. *Applied and Computational Engineering*, 32, 1–12. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/32/20230175>
7. Hudnurkar, S., Rajeevan, A. S., Choudhary, S., Mukherjee, P. D., Kumar Jaiswal, H., & Kadam, K. (2023). Forecasting of Cryptocurrency and Stocks Prices using Machine Learning (edsee.10465415). 1-1-9. <https://doi.org/10.1109/ICSES60034.2023.10465415>
8. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. MIT press. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=omivDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Goodfellow,+I.,+Bengio,+Y.,+%26+Courville,+A.+\(2016\).+Deep+Learning,+MIT+Press.&ots=MOO_dmrGWT&sig=W6wIKnRF01s09knWHnUU12OPChs](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=omivDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=Goodfellow,+I.,+Bengio,+Y.,+%26+Courville,+A.+(2016).+Deep+Learning,+MIT+Press.&ots=MOO_dmrGWT&sig=W6wIKnRF01s09knWHnUU12OPChs)
9. Ariyo, A. A., Adewumi, A. O., & Ayo, C. K. (2014). Stock price prediction using the ARIMA model. 2014 UKSim-AMSS 16th international conference on computer modelling and simulation, 106–112. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7046047/>

Evaluación del efecto de la depuración y supervisión en los sistemas computarizados de análisis seminal

Sevilla, F^{1,2}, Araya-Zúñiga, I³, Matamoros, K¹, Hernández, A⁴, Cervantes, P⁴, Valverde, A¹

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigación y Desarrollo en Agricultura Sostenible del Trópico Húmedo, Laboratorio de Reproducción Animal, Campus Tecnológico Local San Carlos. Alajuela, Costa Rica.

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Doctorado en Ciencias Naturales de para el Desarrollo (DOCINADE). Alajuela, Costa Rica.

³ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Área Académica del DOCINADE, Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad.

⁴ Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Veracruzana. Cuerpo Académico Biotecnología para la Producción y Salud Animal, Maestría en Ciencia Animal

f.sevilla@tec.ac.cr; arayaz.ignacio@gmail.com; kenneth.matamoros@estudiantec.cr;
anvalverde@tec.ac.cr; anhernandez@uv.mx; pcervantes@uv.mx

1. Resumen

Los sistemas de producción agropecuaria presentan desafíos para las próximas décadas y deben ser muy eficientes en sus procesos. La calidad seminal tiene una influencia sobre los parámetros reproductivos de las granjas que afectan la producción. Los sistemas computarizados de análisis seminal permiten obtener resultados más objetivos sobre la calidad seminal, y esto favorece a la selección de los animales más aptos. Por esto, este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de la depuración y supervisión de los valores de movilidad y cinética espermática obtenidos a partir un sistema CASA-Mot. Se utilizaron un total de 50 eyaculados de verracos que se analizaron mediante el sistema CASA-mot (ISAS[®] v1) y se determinaron los resultados depurados y no depurados del sistema. La depuración influyó sobre la movilidad y cinética espermática ($P < 0,05$). Estos resultados sugieren que la depuración y supervisión es necesaria y favorecen a la determinación de valores más fiables.

2. Introducción

Los sistemas agropecuarios deben asegurar la alimentación que demandan las sociedades, y cada vez presentan nuevos desafíos relacionados con la optimización de los recursos y los efectos por las condiciones ambientales del medio ^[1]. La búsqueda de nuevas alternativas que favorezcan estos sistemas y optimicen los procesos, se han intensificado en las últimas décadas ^[2]. Por esto, en el sector pecuario, la implementación de biotecnologías reproductivas favorece los procesos de mejora animal y podrían aumentar la productividad de los sistemas de producción animal ^[3].

La selección de los animales más aptos para la reproducción es importante para mejorar los valores de producción ^[4]. También, la inseminación artificial es una técnica que ofrece numerosas ventajas para los sistemas de producción animal, mejorando la eficiencia en la utilización de los animales ^[5]. Sin embargo, las evaluaciones de las dosis seminales utilizadas en estos procesos son realizadas con métodos poco objetivos y con alta variabilidad, que son insuficientes para determinar la calidad de estos materiales ^[6], ^[7], ^[8]. Los sistemas de análisis seminal asistidos por computadora (CASA,

Computer Assisted Semen Analysis), son tecnologías que han permitido mejorar la selección del material genético que se utilizan ^[6], ^[9], ^[10], a pesar de esto, en muchas actividades agropecuarias no son utilizadas de forma rutinaria ^[11]. Los avances en los sistemas CASA han permitido estudiar la calidad seminal y su relación con la fertilidad y la rentabilidad de las granjas porcinas, permitiendo así una mayor relevancia a este tipo de tecnologías ^[9], ^[12].

A pesar de esto, algunos investigadores consideran necesaria una estandarización en las metodologías de estos sistemas, evitando errores en las estimaciones de la calidad seminal ^[11], ^[13], ^[14]. Los procesos de depuración y supervisión de estos procesos permiten reducir los efectos por las inconsistencias que se puedan presentar en algunas muestras seminales, como la presencia de aglutinaciones o partículas contaminantes ^[15] o errores en la captura de las trayectorias de los espermatozoides ^[16]. Algunos autores sugieren que la verificación y la supervisión son necesarias para mejorar la precisión de las evaluaciones seminales a partir de los sistemas CASA y que podrían utilizarse programas de inteligencia artificial ^[17]. Por esto, este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de la depuración y supervisión de los valores de movilidad y cinética espermática obtenidos a partir un sistema CASA-Mot.

3. Condiciones experimentales

3.1 Descripción del sitio de estudio y aprobación ética.

El estudio se realizó en conjunto con una granja porcina ubicada en el cantón de Río Cuarto, Alajuela, Costa Rica, CRTM05 X: 476875,227792 Y: 1146212,466957. Las evaluaciones seminales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Reproducción Animal de la Escuela de Agronomía, ubicado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus local San Carlos, CRTMO5 X:444381,610229 Y:1146077,566039. El estudio se llevó a cabo siguiendo las leyes y regulaciones para el control de experimentos con animales vivos en Costa Rica, también, se apegó a los principios éticos y con la aprobación del Comité del Centro de Investigación y Desarrollo en Agricultura Sostenible para el Trópico Húmedo del Instituto Tecnológico de Costa Rica (CIDASTH-ITCR), según la Sección 08, 2023, artículo 5.0, DAGSC-075-2023 y CIE-206-2023.

3.2 Dosis de semen y descripción del material experimental

Se utilizaron dos líneas genéticas de verracos reproductores, con una distribución de cinco animales por cada línea genética. Un total de diez animales con edad media de 17,4 $\pm$ 8,6 meses al inicio del estudio y con fertilidad comprobada, a los cuáles se les extrajo el eyaculado al menos dos veces dentro del periodo de estudio. Se utilizaron 50 eyaculados en total. Los procesos de extracción del

eyaculado se realizaron mediante la técnica del doble guante y se mantuvieron los eyaculados a 37°C en un baño maría en granja y se realizó una dilución en proporción 1:1 (v:v; semen:eyaculado) utilizando un diluyente comercial (Zoosperm ND5; Import-Vet, Barcelona, España).

Luego las muestras fueron almacenadas a 17 °C y se trasladaron bajo esas condiciones (garantizando que las dosis seminales mantuvieran una temperatura de 17°C y en posición horizontal) al Laboratorio de Reproducción Animal, este traslado fue menor a una hora y se almacenaron durante 18 horas más en un refrigerador (17 °C).

3.3 Evaluación de la movilidad y la natación espermática mediante un sistema computarizado.

Para el análisis de la movilidad se retiraron las muestras de los eyaculados en conservación almacenados a 17 °C y se reposó en temperatura ambiente durante 30 minutos. Luego, se colocó una alícuota de 1 ml en dos tubos Eppendorf® (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EE. UU.) para conformar las submuestras del eyaculado (dos repeticiones por eyaculado) y estas se mantuvieron en una estufa a 37 °C por 30 minutos.

El análisis de la cinética y movilidad espermática se llevó a cabo mediante el sistema ISAS® v1 (Proiser R+D, S.L. Valencia, España), equipado con cámara de video (Proiser 782M, Proiser R + D), con una resolución final de 768 x 576 píxeles, esta se colocó en el microscopio UB203 (UOP / Proiser R + D) con un ocular 1X y un aumento objetivo de fase de contraste negativa de 10X (AN 0,25) y se capturaron 25 imágenes por segundo, con las siguientes configuraciones del sistema: progresividad del 45% con respecto al índice de rectitud (STR) y una conectividad de 11, además se utilizó como parámetros mínimos para el tamaño de las células el valor de 10 μm^2 y para el máximo el valor de 80 μm^2 . Se utilizó la cámara de recuento espermático Makler® (Sefi Medical Instruments, Haifa, Israel) y se mantuvo a 37°C para evitar el choque térmico sobre las células espermáticas a analizar. También, se calentó a 37 °C la platina del microscopio por medio de una fuente de poder. Se colocó una alícuota de 2,7 μl de cada submuestra sobre la cámara Makler®, y se capturaron al menos siete campos efectivos de análisis donde se analizaron los parámetros de movilidad mediante el módulo CASA-Mot.

3.4 Proceso de supervisión y depuración de análisis seminales

El proceso de depuración de los datos (Figura 1) consistió en la eliminación de aquellas partículas de diluyente que no fueron homogenizadas correctamente, partículas contaminantes propias de la preparación de las muestras en granja, las aglutinaciones presentes en los campos efectivos

capturados, algunas trayectorias de las células espermáticas que se traslaparon entre sí, o cualquier otro factor que influyera sobre el análisis propio del sistema ISAS® v1. Una vez finalizado este proceso de depuración, se exportaron los informes con los resultados de los análisis depurados y no depurados, tanto de movilidad como de la cinética espermática.

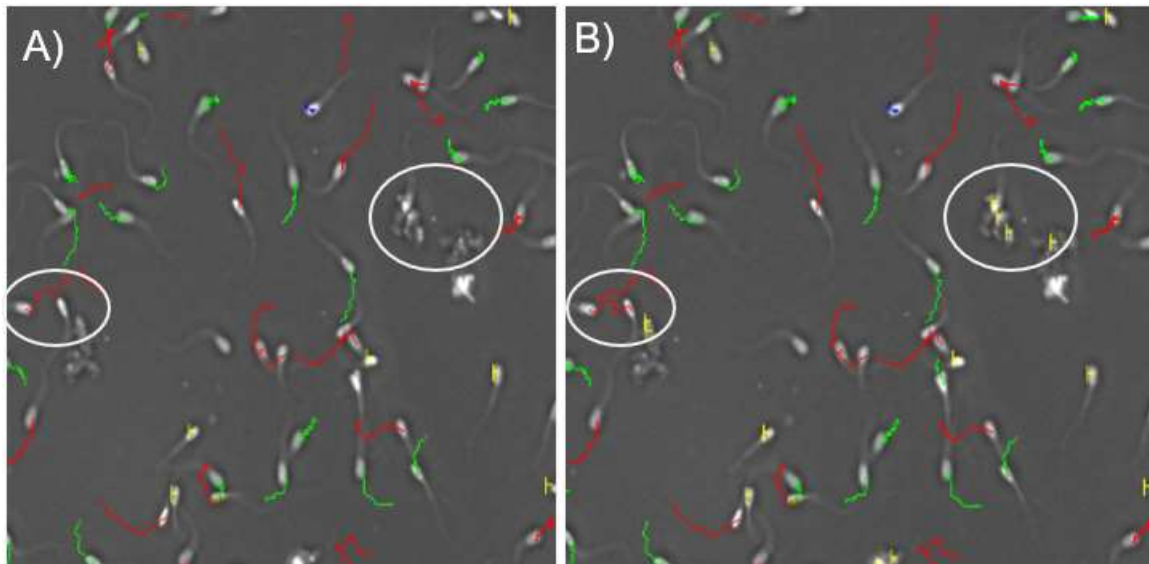


Figura 1. Proceso de depuración para los análisis seminales de verraco por medio del módulo CASA-mot del sistema CASA (ISAS® v1), A) Depurado, B) No depurado.

3.5 Análisis estadístico

Se probaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad para todos los resultados obtenidos, mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y de Levene, respectivamente con el propósito de comprobar que los datos cumplan con la hipótesis de la distribución normal y la homogeneidad de las varianzas.

Se realizó un ANOVA para la comparación de medias, donde se evaluó los valores medios para las variables de movilidad y la cinética espermática de acuerdo con el proceso de depuración y la no depuración de los campos capturados por el sistema CASA-Mot. El ANOVA permitió determinar un efecto de la depuración y supervisión del sistema CASA y las pruebas de comparación de medias determinaron las diferencias existentes en las observaciones realizadas para cada evaluación de acuerdo con los procesos de depuración y no depuración. Las diferencias de las medias se calcularon mediante una prueba LSD de Fisher y con una corrección de los valores mediante la prueba de

Bonferroni. Se consideró una significancia del p-valor del 5%. Todos estos análisis se realizaron con el programa estadístico InfoStat versión 2019.

Se calcularon las diferencias y promedios entre los valores obtenidos por el efecto de la depuración y la no depuración. A partir de ello, se determinó el sesgo estadístico y el intervalo de confianza (95%) mediante los límites estadísticos superiores e inferiores. Una vez determinados todos estos valores se realizó un gráfico de Bland Altman por medio de los gráficos de dispersión del programa Excel®.

4. Resultados y discusión

El proceso de depuración permitió estimar con mayor precisión ($P < 0,05$) los valores de la movilidad total (MT %) y movilidad progresiva (MP%) respecto de muestras no depuradas (Tabla 1).

Tabla 1. Evaluación del proceso de depuración sobre la movilidad espermática (media $\pm$ E.E.) de verraco, obtenida a partir de un sistema CASA-mot (ISAS® v1).

Variable	ISAS® v1 depurado	ISAS® v1 no depurado
MT	82,07 $\pm$ 1,28 ^a	75,91 $\pm$ 1,28 ^b
MP	65,75 $\pm$ 1,27 ^a	56,95 $\pm$ 1,27 ^b

E.E.: Error estándar de la media. MT= Movilidad total (%); MP= Movilidad progresiva (%). ^{a-b} Diferentes letras indican diferencias entre el proceso de depuración y la no depuración. $P < 0,05$.

El resultado obtenido por el sistema ISAS® v1 sin depuración, para la variable de velocidad curvilínea (VCL) fue mayor ($68,96 \pm 0,12 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), que el valor obtenido por el proceso de depuración ($64,05 \pm 0,15 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Para las demás variables de cinética el comportamiento de los resultados fue similar a los valores de movilidad, donde fueron diferentes ($P < 0,05$) los valores de la cinética para el proceso de depuración con respecto al proceso sin depurar. Además, los resultados sugieren que el proceso de depuración permitió obtener valores más altos ($P < 0,05$) en las variables de progresividad y oscilación de los espermatozoides, lo que permite reconocer mejores estimaciones que las estimaciones no depuradas (Tabla 2).

Tabla 2. Evaluación del proceso de depuración sobre la cinética espermática (media $\pm$ E.E.) de verraco, obtenida a partir de un sistema CASA-mot (ISAS® v1).

Variable	ISAS® v1 depurado	ISAS® v1 no depurado

VCL	64,05 $\pm$ 0,15 ^b	68,96 $\pm$ 0,12 ^a
VSL	33,37 $\pm$ 0,09 ^a	30,09 $\pm$ 0,07 ^b
VAP	46,46 $\pm$ 0,10 ^a	44,24 $\pm$ 0,08 ^b
LIN	55,17 $\pm$ 0,10 ^a	47,28 $\pm$ 0,08 ^b
WOB	73,25 $\pm$ 0,07 ^a	66,25 $\pm$ 0,06 ^b
STR	73,61 $\pm$ 0,11 ^a	68,39 $\pm$ 0,08 ^b
BCF	7,92 $\pm$ 0,01 ^a	7,33 $\pm$ 0,01 ^b

E.E.: Error estándar de la media. VSL= velocidad rectilínea ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); VCL= Velocidad curvilínea ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); VAP= velocidad promedio ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); LIN= linealidad de la progresión directa (%); STR= rectitud (%); WOB= oscilación (%); BCF = frecuencia entrecruzamiento (Hz). ^{a-b} Diferentes letras indican diferencias entre el proceso de depuración y la no depuración. $P<0,05$.

Se analizó el proceso de depuración bajo un gráfico de Bland-Altman (Figura 2), donde se comparó las estimaciones depuradas y no depuradas para la MT (%). A partir de ello se obtuvo un valor de 6,16% para el sesgo estadístico, bajo los intervalos de acuerdo con un límite superior de 18,65% e inferior de -6,33%. También, se visualizó una dispersión de los valores que se encuentran dentro de los intervalos de la confianza y casi constante a la tendencia del sesgo estadístico, excluyendo algunos de los valores que se encuentran fuera de los intervalos de confianza. A partir de este gráfico se observan diferencias de acuerdo con la dispersión de los valores en la determinación de las diferencias de la MT (%) en el proceso de depuración. Lo anterior y en cuanto a la comparación de medias realizada (Tabla 1) permite demostrar que la depuración de los resultados obtenidos con el sistema ISAS® v1 mejora los valores de la movilidad y cinética espermática, donde la omisión de este proceso podría subestimar algunos de los resultados obtenidos bajo este sistema.

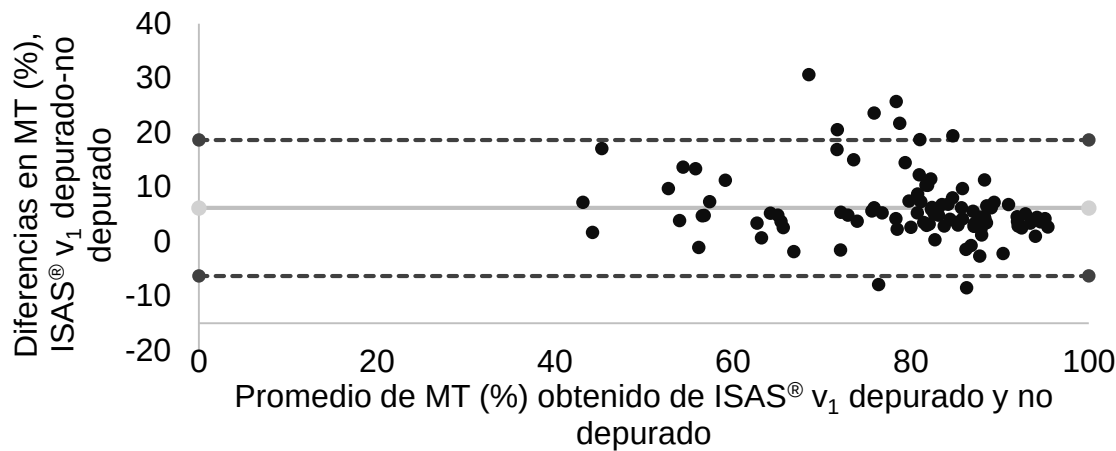


FIGURA 2. GRÁFICO BLAND-ALTMAN SOBRE MOVILIDAD TOTAL (%) DE VERRACO: DIFERENCIA (ISAS® v1: DEPURADO-NO DEPURADO) VS PROMEDIO DE LAS MEDICIONES OBTENIDAS POR EL SISTEMA ISAS® v1 DEPURADO-NO DEPURADO, SAN CARLOS, 2021.

LA DEPURACIÓN DE LOS CAMPOS CAPTURADOS CON EL ISAS® V1 MOSTRÓ UNA MEJORÍA EN LOS VALORES OBTENIDOS PARA LA MOVILIDAD TOTAL Y MOVILIDAD PROGRESIVA. PARA LAS VARIABLES DE CINÉTICA, SE MEJORÓ TODOS LOS VALORES A EXCEPCIÓN DE LA VARIABLE VELOCIDAD CURVILÍNEA (VCL) DONDE FUE MAYOR EL DATO EN EL SISTEMA CASA, ISAS® v1 SIN DEPURACIÓN (CUADRO 1), LO QUE SUGIERE QUE EL SISTEMA TIENDE A SOBRESTIMAR DICHO VALOR EN ESTA VARIABLE. LO ANTERIOR NOS PERMITE INFERIR QUE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS SISTEMAS CASA SIN UNA DEBIDA DEPURACIÓN PODRÍAN SUBESTIMAR LAS VARIABLES DE LA MOVILIDAD Y CINÉTICA DE LOS ESPERMATOZOIDES.

SE CONTRASTA CON LO MENCIONADO POR MÚLTIPLES AUTORES QUE ANALIZAN LA DEPURACIÓN DE LOS SISTEMAS CASA, DEBIDO A QUE PODRÍA MEJORAR LA FIABILIDAD DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR ESTOS ^[12], POR LO QUE EN LOS LABORATORIOS DE REPRODUCCIÓN ANIMAL QUE UTILICEN ESTOS SISTEMAS, DEBERÍAN ESTANDARIZAR Y MEJORAR SUS PROTOCOLOS PARA QUE HAYA MENOS VARIACIÓN EN LOS ANÁLISIS ^[11], ^[14], ^[18], ^[19]. LA DEPURACIÓN ES UNA TÉCNICA QUE PERMITE CORREGIR AQUELLOS POSIBLES ERRORES QUE SE PUEDAN PRESENTAR EN LOS ANÁLISIS SEMINALES POR LOS SISTEMAS ASISTIDOS POR COMPUTADORA; DEBIDO A QUE LA MOVILIDAD Y CINÉTICA DE LOS ESPERMATOZOIDES SE ANALIZA DE ACUERDO CON LAS CAPTURAS DE LAS CABEZAS DE LAS CÉLULAS ESPERMÁTICAS ^[9], ^[14], ^[20].

LA PRESENCIA DE AGLUTINACIONES Y LAS CAUSAS, COMO LA DILUCIÓN O EL MANEJO DE LA MUESTRA ^[15], PODRÍAN INCIDIR QUE ESTAS APAREZCAN E INFLUIR EN LA ESTIMACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS Y LA MOVILIDAD CELULAR ^[16]. ESTO ES MUY IMPORTANTE, PORQUE LA SUBESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE UN ANÁLISIS SEMINAL PODRÍA TENER EFECTOS NEGATIVOS EN LA SELECCIÓN DE LOS REPRODUCTORES EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS Y COMO CONSECUENCIA AFECTAR LOS PARÁMETROS DE FERTILIDAD DE LAS CERDAS INSEMINADAS ^[4], ^[21]. VARIOS AUTORES HAN INCURSIONADO EN LA VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS MEDIANTE PROGRAMAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL POR MEDIO DE MÉTODOS DE APRENDIZAJE SUPERVISADOS, QUE PERMITEN AUMENTAR LA PRECISIÓN EN ESTOS SISTEMAS ^[17], ^[22], LO QUE PERMITIRÍA MEJORAR ESTOS ANÁLISIS.

5. Conclusiones

Se comprobó que el efecto de la depuración en el sistema ISAS® v1 influyó en la determinación de la movilidad y cinética espermática ($P < 0,05$), además, la depuración permitió estimar los parámetros de movilidad y cinética espermática con mayor precisión de los campos efectivos del sistema ISAS® v1. Estos resultados sugieren que los valores obtenidos mediante los procesos de depuración y supervisión de los sistemas computarizados de análisis seminales permiten obtener resultados más fiables, ya que se reduce la influencia de inconsistencias del eyaculado, como las aglutinaciones, contaminantes de la muestra o errores de captura en las trayectorias.

6. Bibliografía

1. H. H. E. van Zanten, H. Mollenhorst, C. W. Klootwijk, C. E. van Middelaar, and I. J. M. de Boer, "Global food supply: land use efficiency of livestock systems," *Int J Life Cycle Assess*, vol. 21, no. 5, pp. 747–758, May 2016, doi: 10.1007/s11367-015-0944-1.
2. G. Del Angel-Lozano, M. Á. Escalona-Aguilar, J. Baca del Moral, and V. Cuevas-Reyes, "Principios y prácticas agroecológicas para la transición hacia una ganadería bovina sostenible. Revisión," *Rev Mex Cienc Pecu*, vol. 14, no. 3, pp. 696–724, Jul. 2023, doi: 10.22319/rmcp.v14i3.6287.
3. Ugur, M. R., Saber Abdelrahman, A., Evans, H. C., Gilmore, A. A., Hitit, M., Arifiantini, R. I., ... & Memili, E. "Advances in Cryopreservation of Bull Sperm," *Front Vet Sci*, vol. 6, Aug. 2019, doi: 10.3389/fvets.2019.00268.
4. J. Gadea, E. Sellés, and M. A. Marco, "The predictive value of porcine seminal parameters on fertility outcome under commercial conditions," *Reproduction in Domestic Animals*, vol. 39, no. 5, pp. 303–308, Oct. 2004, doi: 10.1111/j.1439-0531.2004.00513.x.
5. R. V. Knox, "Artificial insemination in pigs today," *Theriogenology*, vol. 85, no. 1, pp. 83–93, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.theriogenology.2015.07.009.
6. J. L. Yániz, M. A. Silvestre, P. Santolaria, and C. Soler, CASA-Mot in mammals: an update, vol. 30, no. 6. CSIRO, 2018, pp. 799–809. doi: 10.1071/RD17432.
7. P. Vyt, D. Maes, T. Rijsselaere, E. Dejonckheere, F. Castryck, and A. Van Soom, "Motility Assessment of Porcine Spermatozoa: a Comparison of Methods," *Reproduction in Domestic Animals*, vol. 39, no. 6, pp. 447–453, Dec. 2004, doi: 10.1111/J.1439-0531.2004.00538.X.
8. M. L. W. J. Broekhuijse, E. Soštarić, H. Feitsma, and B. M. Gadella, "Additional value of computer assisted semen analysis (CASA) compared to conventional motility assessments in pig artificial insemination.," *Theriogenology*, vol. 76, no. 8, pp. 1473–86.e1, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.theriogenology.2011.05.040.
9. Valverde, V. Barquero, and C. Soler, "The application of computer-assisted semen analysis (CASA) technology to optimise semen evaluation. A review," *J Anim Feed Sci*, vol. 29, no. 3, pp. 189–198, Sep. 2020, doi: 10.22358/jafs/127691/2020.
10. M. L. W. J. Broekhuijse, A. H. Gaustad, A. Bolarin Guillén, and E. F. Knol, "Efficient Boar Semen Production and Genetic Contribution: The Impact of Low-Dose Artificial Insemination on Fertility," vol. 50, pp. 103–109, Jul. 2015, Accessed: Feb. 17, 2021. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1111/rda.12558>
11. Valverde and M. Madrigal Valverde, "Sistemas de análisis computadorizado de semen en la reproducción animal," *Agronomía Mesoamericana*, vol. 29, no. 2, p. 469, May 2018, doi: 10.15517/ma.v29i2.30613.
12. R. P. Amann and D. Waberski, "Computer-assisted sperm analysis (CASA): Capabilities and potential developments," *Theriogenology*, vol. 81, no. 1, pp. 5-17.e3, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.theriogenology.2013.09.004.

13. M. L. W. J. Broekhuijse, E. Šoštarić, H. Feitsma, and B. M. Gadella, "Application of computer-assisted semen analysis to explain variations in pig fertility," *J Anim Sci*, vol. 90, no. 3, pp. 779–789, Mar. 2012, doi: 10.2527/jas.2011-4311.
14. J. C. Lu, Y. F. Huang, and N. Q. Lü, "Computer-aided sperm analysis: past, present and future," *Andrologia*, vol. 46, no. 4, pp. 329–338, May 2014, Accessed: Feb. 19, 2021. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/and.12093>
15. C. Hansen, T. Vermeiden, J. P. W. Vermeiden, C. Simmet, B. C. Day, and H. Feitsma, "Comparison of FACSCount AF system, Improved Neubauer hemocytometer, Corning 254 photometer, SpermVision, UltiMate and NucleoCounter SP-100 for determination of sperm concentration of boar semen," *Theriogenology*, vol. 66, no. 9, pp. 2188–2194, Dec. 2006, doi: 10.1016/J.THERIOGENOLOGY.2006.05.020.
16. R. Finelli, K. Leisegang, S. Tumallapalli, R. Henkel, and A. Agarwal, "The validity and reliability of computer-aided semen analyzers in performing semen analysis: a systematic review," *Transl Androl Urol*, vol. 10, no. 7, pp. 3069–3079, Jul. 2021, doi: 10.21037/tau-21-276.
17. M. Yeste, S. Bonet, J. E. Rodríguez-Gil, M. M. R. Del Álamo, and M. M. Rivera Del Álamo, "Evaluation of sperm motility with CASA-Mot: Which factors may influence our measurements?," *Reprod Fertil Dev*, vol. 30, no. 6, pp. 789–798, Jun. 2018, doi: 10.1071/RD17475.
18. M. L. W. J. Broekhuijse, E. Šoštarić, H. Feitsma, and B. M. Gadella, "The value of microscopic semen motility assessment at collection for a commercial artificial insemination center, a retrospective study on factors explaining variation in pig fertility," *Theriogenology*, vol. 77, no. 7, pp. 1466–1479.e3, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.theriogenology.2011.11.016.
19. F. Sevilla, C. Soler, I. Araya-Zúñiga, V. Barquero, E. R. S. Roldan, and A. Valverde, "Are There Differences between Methods Used for the Objective Estimation of Boar Sperm Concentration and Motility?," *Animals*, vol. 13, no. 10, p. 1622, May 2023, doi: 10.3390/ani13101622.
20. S. T. Mortimer and C. J. De Jonge, "CASA—Computer-Aided Sperm Analysis," *Encyclopedia of Reproduction*, pp. 59–63, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-801238-3.64935-8.
21. V. Barquero et al., "Relationship between Fertility Traits and Kinematics in Clusters of Boar Ejaculates," *Biology (Basel)*, vol. 10, no. 7, p. 595, Jun. 2021, doi: 10.3390/biology10070595.
22. J. Ehlers, M. Behr, H. Bollwein, M. Beyerbach, and D. Waberski, "Standardization of computer-assisted semen analysis using an e-learning application," *Theriogenology*, vol. 76, no. 3, pp. 448–454, Aug. 2011, Accessed: Feb. 17, 2021. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21529919/>

Modelo anatomico de becerra "*Bos primigenius taurus*" para disección tipo empleado en la enseñanza de la anatomía en la FMVZ-UNAM

Pérez, S.P¹, Trejo, S.M¹., Ovando, F.D¹., Banda, H.J¹.

¹ Área de Anatomía. Departamento de Morfología. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.

Universidad Nacional Autónoma de México.

3012pspame@gmail.com, moby_ts@yahoo.com, obatalamx@yahoo.com,
mcmvzalfonsobanda@gmail.com

1.- Resumen

El estudio de la anatomía ha sido un pilar fundamental en la enseñanza de la medicina veterinaria desde sus inicios. No es posible formar a un médico veterinario zootecnista

desde un punto de vista estrictamente teórico, por esta razón la disección de cadáveres previamente preservados desempeña un papel fundamental en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Esta práctica es considerada por muchos irremplazable, ya que permite al estudiante desarrollar habilidades y destrezas al manipular los órganos y tejidos, a la vez que le confiere una mejor percepción de las estructuras que componen el cuerpo animal. Sin embargo existen desventajas en las técnicas de conservación ya que los cadáveres sufren cambios en su textura, además de requerir refrigeración constante para prolongar su vida útil y de representar un riesgo de salud para quienes los manipulan debido a su corta durabilidad, por ello el área de anatomía del Departamento de Morfología de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia está implementando una innovadora alternativa en la preparación de especímenes, la cual consiste en el embalsamamiento de los cadáveres utilizando una solución conservadora denominada “Dpineda”, cuyas ventajas incluyen que los cadáveres conserven su textura y flexibilidad al momento de manipularlos, no requiere refrigeración para su conservación a lo largo del semestre, únicamente deberán cubrirse con telas embebidas con la solución conservadora a temperatura ambiente, lejos de los rayos solares, su tiempo de duración puede ser de hasta 5 años y no es toxica al tacto, por lo tanto se puede manipular sin el uso de guantes.

2.- Introducción

El estudio de la anatomía en la medicina veterinaria ha sido tradicionalmente el pilar fundamental para la formación de médicos veterinarios zootecnistas^[1]. Los conocimientos adquiridos a partir de ella son indispensables para el desarrollo profesional. Entre otras cosas, el hecho de que sus aplicaciones clínicas faciliten el diagnóstico y confieran una gran precisión tanto al médico que realiza clínica como al que realiza cirugía para realizar su trabajo.

La disección de cadáveres ha sido la base para la enseñanza de la anatomía en la medicina veterinaria desde tiempos antiguos^[2] y es parte fundamental para la educación médica^[3], esta práctica le permite al estudiante aproximarse a la realidad mediante la observación y la manipulación de estructuras anatómicas con características muy similares a las del organismo vivo ^[4]. El uso de cadáveres es aun en nuestros días la mejor manera de proporcionar una visión tridimensional de la anatomía a los estudiantes de medicina veterinaria y zootecnia. La interacción con el cadáver permite tener una mejor percepción de las dimensiones, relaciones, textura, tamaño, color y forma de todas las estructuras que conforman el cuerpo animal, por esta razón constituye un elemento de incalculable valor para la formación del médico veterinario zootecnista ^[5,6].

El uso de cadáveres en la enseñanza de la anatomía ha creado la necesidad de conservar los órganos y tejidos durante periodos de tiempo prolongado, lo que permite su manipulación y disección retardando la descomposición de los mismos. Para lograr este objetivo se han creado diferentes técnicas de fijación y conservación, con el fin de

mantener por tiempo prolongado las características de los tejidos, en un estado similar al del individuo vivo^[7], para que las estructuras que componen el cuerpo animal sean evidentes durante la disección.

Estas técnicas tienen como finalidad disminuir el riesgo de exposición del personal a los agentes infecciosos presentes en el ejemplar a conservar^[8].

Desde tiempos remotos se han creado y aplicado diversas técnicas de conservación, las más utilizadas en la actualidad se basan en la perfusión intra arterial se soluciones fijadoras-conservadoras ^[9, 10, 11, 12], la composición de estas varía en función de las necesidades generadas por diferentes factores como condiciones climáticas del sitio donde se ubica el laboratorio^[13], disponibilidad de recursos^[14], uso al que estará destinada la pieza y la dificultad para conseguir material biológico. Durante muchos años la sustancia química más utilizada para este propósito ha sido el formaldehído, basado principalmente en sus diluciones como la formalina al 10%, sin embargo, una desventaja a considerar en el uso de este químico es el efecto adverso que representa sobre la salud humana, entre ellos los vapores emitidos en el aula ya que provocan irritación en vías respiratorias, lagrimeo constante y para su manipulación es obligatorio del uso rutinario de guantes.

El embalsamamiento de cadáveres con la solución conservadora “DPineda” ^[15], tiene ventajas dentro del aula reduciendo el nivel de exposición a los vapores tóxicos del formaldehído, además de preservar los cadáveres con buena coloración y textura, cuya experiencia realista viene a enriquecer el aprendizaje.

Desde hace 5 años el área de anatomía del departamento de morfología de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) trabaja convencionalmente con la solución conservadora “Dpineda” es decir, se está iniciando con una colección de cadáveres de animales domésticos previamente embalsamados con dicha solución. Esta nueva fórmula se inyecta a través de la arteria carótida común, permitiendo una optimización del cadáver ya que se difunde por todos los tejidos. Posteriormente a estos especímenes se les realizan disecciones “tipo”, es decir, los académicos y ayudantes de profesor realizan disecciones de los sistemas y aparatos que serán empleadas en el aula como material didáctico y demostrativas en el anfiteatro.

La ventaja de esta técnica es que la solución con la que se preparan los cadáveres no es toxica, los cadáveres no requieren refrigeración, únicamente deberán guardarse a temperatura ambiente, lejos de los rayos solares, cubiertos con tela embebida con dicha solución y su tiempo de duración puede rebasar los 5 años.

El objetivo del material biológico disecado es formar parte de una colección de piezas anatómicas complementarias al material didáctico ya existente, lo que permitirá la observación de estructuras anatómicas presentes en las diferentes regiones y cavidades corporales, además de apoyar el proceso de enseñanza aprendizaje de los alumnos de anatomía veterinaria y a todo estudiante interesado de asignaturas subsecuentes como son cirugía y clínicas.

Esta técnica ya se ha trabajado en perros, dando muy buenos resultados, por ello se decidió probar esta técnica en otras especies, en este caso una becerro (*Bos primigenius taurus*) de raza Holstein, para el estudio de la anatomía comparada, lo cual será de gran importancia para la formación de futuros Médicos Veterinarios Zootecnistas.

3.- Materiales y métodos

1. Material

Para la elaboración de este proyecto se utilizaron los siguientes materiales: el cadáver de una becerro, la solución conservadora "Dpineda", instalaciones del área de anatomía veterinaria del Departamento de Morfología de la FMVZ-UNAM para realizar el embalsamamiento y posteriormente la disección, así como instrumental del estuche de disección básico.

Materiales de embalsamamiento:

- *Bomba peristáltica PORTI-BOY Mark V® con capacidad de 3 galones*
- *Manguera sonda 4.8 mm*
- *Cánula calibre 12 (10.5cm / 4.3 ")*
- *Solución conservadora "DPineda"*
- *Cámara de congelación a temperatura de -20°C*
- *Cadáver de becerro (*Bos primigenius taurus*)*

Materiales para la disección:

- *Bisturí mango #3*
- *Navaja para bisturí #11*
- *Pinzas con dientes de ratón*
- *Pinzas hemostáticas de Kelly curva y recta*
- *Tijeras de mayo recta y curva*
- *Sonda canalada*
- *Estilete*
- *Aspiradora koblenz®*
- *Rasuradora andis® con navaja #40*

- *Esmeriladora angular de 4-1/2" (115mm) de la marca Black+Decker®*
- *Martillo de carpintero de la marca Truper® de 16 oz (4.53 gr)*
- *Guantes de látex*
- *Cámara fotográfica Sony alfa 230®*
- *Bata blanca*
- *Cubre bocas KN95*

2. Metodología

2.1 Preparación del cadáver

La preparación inicia con la selección del cadáver, este tiene un peso aproximado entre 25 a 30 kg, después se diseco el paquete carotideo, para tener acceso a la arteria carótida común, la cual se utilizó para introducir la cánula la cual va conectada a la sonda de la bomba peristáltica PORTI-BOY Mark V®, aproximadamente se vertieron 30 litros de solución conservadora. La solución conservadora se inyecta a una presión de 15 libras durante 15 a 20 minutos aproximadamente, para que esta se distribuya por todo el cuerpo a través del aparato circulatorio.

Terminando este proceso se congelo el cadáver a una temperatura de menos 15°C durante 15 días, para que la solución conservadora aumentara su eficacia en el efecto de embalsamamiento.

Una vez transcurrido estos días el cadáver se sacó de la cámara de congelación y se dejó temperar 24 horas, posteriormente se inició con el proceso de disección.

2.2 Disección

Es importante mencionar que para este caso el espécimen debe encontrarse libre de alteraciones patológicas macroscópicas, ya que estas pueden alterar el estudio anatómico. Se incidió por planos anatómicos de externo a interno hasta llegar a las cavidades torácica y abdominal.

4.- Resultados

Este método de embalsamamiento preserva durante mucho tiempo al cadáver con una fidelidad de color, textura y ligera flexibilidad musculo articular sin la necesidad de tener congeladores para su almacenamiento.

La capacidad de los cadáveres puede mejorarse mediante la inyección de silicona de color, en arterias, venas o ambos, lo que permite observar la irrigación de las regiones. Los cadáveres pueden almacenarse por muchos años sin necesidad de refrigeración o

congelación, sin representar mayores riesgos para la salud de quienes lo manipulan y permanecer sellados en bolsas de plástico.

Los cadáveres embalsamados con este método no irritan las vías respiratorias una vez que son disecados, presentan una ligera flexibilidad, preservación de color del músculo y órganos, además presentan propiedades antimicrobianas y antifúngicas que permiten incluso diseccionar sin guantes.

5.- Conclusión

La técnica de embalsamiento utilizando la solución conservadora “DPineda”, permite obtener material anatómico perdurable a largo plazo, con las ventajas de que no necesitan estar en refrigeración, no irrita las vías respiratorias una vez que son disecados, presentan una ligera flexibilidad, preservación de color del músculo y órganos, permitiendo no solo el conocimiento anatómico sino también una amplia gama de procedimientos como quirúrgicos, o de entrenamiento para técnicas de inseminación artificial, o transferencia de embriones.

6.- Bibliografía

1. Ajayi IE., Shawulu JC., Ghaji A., Omeiza GK., Ode OJ. Use of formalin and modified gravity-feed embalming technique in veterinary anatomy dissection and practicals. *Journal of Veterinary Medicine and Animal Health* 2011; 3(6):79-81.
2. Aziz MA., McKenzie JC., Wilson JS., Cowie RJ., Ayeni SA., Dunn BK. The human cadaver in the age of biomedical informatics. *Anat Rec* 2002; 269(1):20-32
3. Collipal LE., Silva MH., Estudio de la anatomía en cadáver y modelos anatómicos. Impresión de los estudiantes. *Int J Morphol* 2011; 29(4):1181-1185
4. Cornwall J., Stringer MD. The wider importance of cadavers: educational and research diversity from a body bequest program. *Anat Sci Educ* 2009; 2(5):234-237
5. Guimarães da Silva RM, Matera JM, Ribeiro AA. Preservation of cadavers for surgical technique training. *Vet Surg* 2004; 33(6):606-608.
6. Janczyk P., Weigner J., Luebke-Becker A., Kaessmeyer S., Plendl J. Nitrite pickling salt as an alternative to formaldehyde for embalming in veterinary anatomy-A study based on histo- and microbiological analyses. *Ann Anat* 2011; 193(1):71- 75.
7. Kerckaert I., Van Hoof T., Pattyn P., D'Herde K. Endogent: centre for anatomy and invasive techniques. *Anatomy* 2008; 2:28-33.
8. Korf HW., Wicht H., Snipes RL., Timmermans JP., Paulsen F., Rune G., et al. The dissection course - necessary and indispensable for teaching anatomy to medical students. *Ann Anat* 2008; 190(1):16-22
9. Muñetón GC., Ortiz JA. Conservación y elaboración de piezas anatómicas con sustancias diferentes al formol en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de La Salle. *Rev Med Vet* 2011; 22: 51-55.

10. Parker LM., Anatomical dissection: why are we cutting it out? Dissection in undergraduate teaching. ANZ J Surg 2002; 72(12):910-2.
11. Rizzolo LJ., Stewart WB. Should we continue teaching anatomy by dissection Anat Rec B New Anat 2006; 289(6):215-218.
12. Saeed M., Rufai A., Elsayed S. Mummification to plastination. Saudi Med J 2001; 22 (11):956-959.
13. Von Hagens G., Heidelberg., Plastination folder 1985. Collection of all technicals leaflets for plastination. Second english edition 1986
14. Whitehead MC, Savoia MC. Evaluation of methods to reduce formaldehyde levels of cadavers in the dissection laboratory. Clinical Anatomy 2008; 21:75- 81
- 15.- Pineda MD., Valencia CL., Gonzalez FJ. Nueva Fórmula de Dpineda usada en la Universidad Nacional Autónoma de México y en la Universidad de Costarica, para preservación de cadáveres. Rev. Panam. Morf. 2024; 67:83

REPARACIÓN QUIRÚRGICA DE HERNIA COMO ALTERNATIVA EN LA PRODUCCIÓN PORCINA Y SU EFECTO EN EL BIENESTAR ANIMAL Y LA SIMULTÁNEA COMPARACIÓN ENTRE ANESTESIA INYECTADA E INHALADA.

Amaya H.M. J. (majoahdz@gmail.com)*, Gutiérrez P.O.

Centro de Enseñanza, Investigación e Investigación en Producción Porcina (CEIEPP), FMVZ. UNAM.

1.Introducción.

La presencia de hernias en granjas porcinas llega a convertirse en un problema (Bates, 2008) en especial para los pequeños productores donde impacta directamente en sus ingresos por animal a venta. Cuando se habla de hernias escrotales y umbilicales, estas reportan una frecuencia en su presentación de 1.7 a 6.7%. (Bates, 2008). El impacto mencionado se da por retraso en el crecimiento, menor valor al mercado derivado de la presencia de este defecto, decomiso de canales y una mayor probabilidad de mortalidad de los ejemplares durante la crianza, disminuyendo su valor al mercado (Gebhardt et al., 2020). Por otra parte, algunas hernias llegan a un volumen que interfiere con la movilidad de los animales y si estas llegan a ulcerarse afectan el bienestar animal del sujeto afectado.

Aunque el cerdo se ha convertido en la especie de elección al momento de elegir modelos experimentales, las intervenciones quirúrgicas en granja se limitan a la orquiectomía. Aun así, en la producción las cirugías se deben clasificar como cirugías de rutina y de urgencia, ambos tipos se realizan con fines zootécnicos, de salud y bienestar en cerdos.

En este trabajo se propone la reparación quirúrgica como alternativa viable para disminuir el problema y mejorar la calidad de vida de los cerdos con hernias.

2. Material y Métodos.

En este trabajo se realizó la evaluación de la ganancia de peso (G.D.P) y la conversión alimenticia (C.A.) obtenidos en 6 animales con presencia de hernia sometidos a Herniorrafia (Anderson and Mulon, 2019), separándolos en 2 grupos, a los cuales se les realizó una valoración completa incluyendo anamnesis completa y un examen clínico con la evaluación del tipo de hernia, y se compararon contra los obtenidos por 3 cerdos sin hernia del mismo peso y edad, mantenidos en corraletas similares a las del grupo experimental. Los sujetos incluidos para la reparación quirúrgica de hernia (herniorrafia), se sometieron a los cuidados prequirúrgicos. Se programó la cirugía destinando a cada individuo a uno de los dos grupos experimentales: anestesia fija o inhalada (Tiletamina-Zolazepam o Isoflurano). También se dio seguimiento inmediato después de la cirugía a parámetros de bienestar postquirúrgico en el paciente (presencia o no de temblores, vocalizaciones, salivación y bruxismo) y posteriormente a su comportamiento social y de movilidad ya recuperados de la intervención dentro de su corraleta.

3.Resultados y discusión.

Para la interpretación de los parámetros productivos, debe considerarse que los cerdos herniados comúnmente se encuentran dentro de los cerdos retrasados en cuanto a sus compañeros de lote, sin embargo, los cerdos

s operados, lograron parámetros competitivos con los cerdos que no presentaban hernia (Cuadro 1), sugiriendo que la cirugía resulta beneficiosa no solo para el cerdo, sino también para el productor.

Cuadro 1. Comparación de parámetros productivos.

Grupo	Días postcirugía en ganar 30Kg	G.D. P.	C.A.
G. Control	33.27	0.92	2.45 :1
G. Anestesia inyectada	33.49	0.92	2.96 :1
G. Anestesia inhalada	35.64	0.90	2.35 :1

Bajo la premisa anteriormente planteada de que un cerdo con hernia por lo general tiene un menor rendimiento, nuestros resultados demuestran que sin la presencia de una hernia limitante los animales continúan con un crecimiento normal.

En cuanto la comparación entre anestésicos, inició al momento en que se realizó el procedimiento quirúrgico, evaluando que, durante todo el procedimiento, ambos grupos permanecieron en plano quirúrgico. La evaluación post quirúrgica consistió en medir el tiempo de recuperación, siendo el grupo de anestesia inhalada el tardar menos tiempo en salir del plano quirúrgico (11 minutos), en comparación con los de anestesia inyectada (49 minutos) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tiempo de recuperación.

Grupo	Duración de cirugías (hrs)	Tiempo de recuperación (hrs)

G. Anestesia inyectada	1:03	0:49
G. Anestesia inhalada	0:51	0:11

Por su parte, solo algunos animales mostraron ligero malestar postquirúrgico como salivación y presencia de temblores (Cuadro 3), pero no de dolor con una recuperación completa y sin secuelas como excesivo nerviosismo, rechazo al movimiento, agresividad acentuada, vocalizaciones persistentes o menor resistencia a ser movilizados en el manejo rutinario como alimentación y limpieza de sus corraletas demostrando que superan la intervención sin complicaciones, lo que coincide con las observaciones de Dobromylskyj, 2005. También su capacidad de movilización, juego y curiosidad se mantuvo normal dentro del corral, reflejando un cambio en el bienestar animal al ya no presentar la incomodidad de la masa pendulante y/o sobre crecimientos asociados a las hernias, disminuyendo además el riesgo de laceraciones, evisceraciones e incluso la muerte de los ejemplares, riesgos latentes mencionados por Ros,2020 en animales con este problema.

Cuadro 3. Comportamiento del paciente postcirugía.

Individuo	Salivación	Vocalizaciones	Temblores	Bruxismo
M-01	No	No	No	No
M-03	No	No	Si	No
M-05	Si	No	Si	No
M-07	No	No	No	No
M-10	No	No	No	No
M-12	No	No	No	No

4.Conclusiones.

La herniorrafia en este estudio, demostró ser una opción viable para la producción porcina al mantener al ejemplar con hernia en la línea de producción sin tener el riesgo de que su precio sea castigado por el comprador, disminuyendo el riesgo de sufrir lesiones y o complicaciones más o menos graves durante la engorda.

Si bien ambos anestésicos son viables y compatibles con la especie porcina, el uso de anestesia fija (inyectada) resulta práctica, económica y beneficiosa para la realización de cirugías de rutina en la producción pecuaria, en cambio el uso de anestesia inhalada puede resultar más costosa y laboriosa para su empleo en pequeñas producciones, sin embargo su empleo en cirugías de urgencia y procedimientos de investigación es beneficiosa, pues facilita la práctica de procedimientos de larga duración.

Por su parte ante la opinión pública que cada vez exige más prácticas de bienestar animal en las producciones, estas intervenciones que demuestran el interés por mejorar las condiciones de vida de los animales con estas afecciones, son bien percibidas lo que se suma a la ganancia obtenida al mantener los parámetros productivos de estos pacientes.

5.Referencias.

1. Anderson and Mulon, (2019) en: Diseases of Swine 11th edition. Cap 11.pp 171-196. Wiley Blackwell
2. Bates Ronaldo y Straw Bárbara. (2008). Informe Trimestral de Cerdos en la Universidad Estatal de Michigan, Volumen 13.
3. Dobromylskyj, P et al. (2005) en: Pain Management in Animals 1st. edition. Pp 53-80. Elsevier.
4. Gebhardt, JT, Tokach, M D, Dritz, SS, et al. (2020). Translational Animal Science. 4 (2) 462–484 Ros
5. Cordova, A. et al. (2009) en: Revista Electrónica de Veterinaria, vol. 10, núm. 12.

Palabras clave. Bienestar animal, cirugía, hernia, anestesia, cerdos.

**Evaluación de la producción de especies reactivas en
espermatozoides bovinos criopreservados en dos medios
comerciales adicionados con MitoTempo**

*Mejía-Flores, I.¹, Hernández-Ignacio, J.², Chiquete-Félix, N.³, Navarrete-García, M.G.¹, Luna-Silva, J.N.¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México – Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
Departamento Ciencias Pecuarias. Campo Cuatro, Km. 2.5 Carr. Cuautitlán-Teoloyucan, San
Sebastian Xhala, Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, México, C. P. 54714.

²Universidad Nacional Autónoma De México, Departamento de Reproducción FMVZ-UNAM, C.U.,
CDMX, México, C. P. 04510.

³Universidad Nacional Autónoma De México, Instituto de Fisiología Celular, C.U., CDMX, México, C.
P. 04510.

nayazaitmf@cuautitlan.unam.mx, tysonjhi@hotmail.com, nchiquete@ifc.unam.mx,
monymellark12@gmail.com, juliostark54@gmail.com

1. Resumen

El proceso de congelación y descongelación provoca estrés oxidativo y osmótico, choque térmico, formación de hielo intracelular, cambios en la composición lipídica y proteica de la membrana plasmática, disminución de la viabilidad y la motilidad espermática, daños en el acrosoma, la cola y en las mitocondrias. La mitocondria es la fuente de energía de la respiración y también el principal lugar de generación de especies reactivas del oxígeno (EROs). Las especies reactivas del oxígeno (EROs), tienen la capacidad de alterar reversible o irreversiblemente la función celular. Se ha propuesto que las EROs modifican la bioquímica y la fisiología del espermatozoide. Por otro lado, los antioxidantes pudieran proteger a los espermatozoides del daño producido por las ERO. El objetivo del presente estudio fué evaluar la producción de EROs, por fluorescencia en espectrofotometro, en espermatozoides de bovino criopreservados en presencia de dos tipos de diluyentes comerciales adicionados con 25 μ M y 50 μ M de un antioxidante. Se emplearon 3 toros sanos de la raza Brangus de los cuales se obtuvieron y evaluaron 3 muestras de eyaculado por cada toro, los eyaculados se dividieron para su congelación en 2 medios: Grupo 1 medio *Triladyl*® y Grupo 2 medio *AndroMed*®. Las diferentes concentraciones del antioxidante se agregaron al momento del empajillado. Al descongelado se realizó la evaluación de la motilidad y la medición de producción de EROs en los espermatozoides de bovino. Las especies reactivas de oxígeno se midieron en mitocondrias frescas utilizando el Amplex Red y su fluorescencia se midió en un detector POLARstar Omega ajustado a 571 y 585 nm. La fluorescencia se detectó después de 30 minutos y los resulta se interpolaron con una curva de calibración. Se empleó ANOVA de una vía (prueba de comparación múltiple de Dunnett)

para comprar las medias de producción de EROs en ambos medios utilizados y en los tratamientos con 2 concentraciones de MitoTEMPO (MT), el Tx 2 (25 μ M) y el grupo 3 (50 μ M), usando GraphPad Prism Versión 5 (GraphPad Software, Inc., La Jolla, CA, EE.UU.), con un valor de $P \leq 0.05$. Los resultados obtenidos, muestran una menor producción de EROs en ambos medios de congelación adiconados con MitoTempo *Triladyl*® y *AndroMed*® con 25 μ M (0.33 μ M *AndroMed*® vs 1.40 μ M *Triladyl*®) y 50 μ M (0.41 μ M *AndroMed*® vs 1.57 μ M *Triladyl*®) con respecto al tratamiento control sin antioxidante (0.42 μ M *AndroMed*® vs 1.82 μ M *Triladyl*®), se observó una mayor cantidad de EROs en los espermatozoides congelados en el medio *Triladyl*®. Se concluye que la suplementación del antioxidante a una concentración de 25 mM en el diluyente comercial *AndroMed*® (0.33) mejoró la producción de EROs en el esperma bovino congelado-descongelado. Estos resultados respaldan la importancia de utilizar antioxidantes durante la criopreservación del esperma, lo que será muy beneficioso para la IA en términos de producción de ganado bovino.

PALABRAS CLAVES: ANTIOXIDANTE, ESPERMATOZOIDE, CRIOPRESERVACIÓN, ESPECIES REACTIVAS DE OXIGENO.

2.Introducción

En la práctica veterinaria, el uso de biotecnologías reproductivas, como lo es la inseminación artificial (IA), permite mejorar la rentabilidad de las unidades de producción creando un importante avance genético (Marizancén, 2017). El uso de esta tecnología y el potencial en el área de reproducción requirió que se buscaran técnicas como la criopreservación del semen (Fernandez, 2022).

La preservación del material genético del macho es un proceso complejo que requiere el mantenimiento de la calidad inicial del eyaculado y el manejo de la muestra, con el fin de evitar daños irreversibles a la célula espermática (Salinas, 2014).

La crio-preservación induce una serie de cambios funcionales y estructurales a las células espermáticas, en donde la membrana plasmática y la membrana acrosomal externa, sufren algunos daños subletales. Un ejemplo del daño es la capacitación prematura del espermatozoide, la cual ocurre al momento de la congelación/descongelación (Valdez, 2017).

La inducción prematura de la capacitación y reacción acrosomal alteran la función mitocondrial y de este modo se reduce la motilidad espermática (Layek *et al.*, 2016). La mitocondria es la fuente de energía de la respiración y también es el sitio principal de la generación de especies reactivas de oxígeno (EROs). Así mismo, durante los procesos de congelación/descongelación del semen se producen EROs las cuales presentan efectos nocivos para el espermatozoide. El plasma seminal y los espermatozoides presentan un sistema antioxidante que le ayuda a atenuar el daño del estrés oxidativo. Sin embargo, el espermatozoide posee una pequeña porción citoplasmática escasa para generar la protección antioxidante durante el estrés causado por la congelación/descongelación (Valdez, 2017).

Muchos estudios han informado que la suplementación de antioxidantes durante el proceso de congelación del semen puede mejorar la calidad del espermatozoides congelado-descongelado en diversos grados, pero aún existe una falta de un antioxidante eficaz reconocido (Lu, X *et al.*, 2017). Los avances recientes en el estrés oxidativo sugirieron que para intervenir en la producción de ROS deberían dirigirse directamente a las mitocondrias para lograr actividades antioxidantes eficaces (Gruber *et al.*, 2013). El antioxidante empleado en este estudio, el cual elimina el superóxido de la mitocondria, está compuesto por la unidad de nitróxido de piperidina (TEMPOL) y la fracción lipofílica trifenílfosfonio (TPP), es permeable; pasa rápidamente a través de las membranas de la bicapa lipídica y se acumula masivamente en las mitocondrias energizadas, el sitio principal de generación de EROS. Esto lo convierte en un sensor molecular útil para la detección de la producción de superóxido intracelular, la atenuación de la apoptosis inducida por el estrés y la necrosis (Lu, X *et al.*, 2017).

Hasta ahora, se han realizado pocos estudios sobre los efectos de un antioxidante mitocondrial adicionado MitoTempo en la crioconservación del semen. Por tanto, la evaluación del efecto de añadir este tipo de antioxidante a los medios de crioconservación será muy beneficiosa para la industria de la inseminación artificial bovina.

Dada la importancia de lo anterior expuesto, el objetivo del presente estudio fué evaluar los efectos del antioxidante a diferentes concentraciones sobre la producción de EROS, adiconado al momento de la criopreservación de semen bovino empleando dos diluyentes comerciales; con el objeto de mejorar la capacidad fertilizante en el ganado bovino.

3. Condiciones experimentales

Evaluación del semen: macroscópica y microscópicamente, se evaluaron antes y despues de la criopreservación. Se emplearon 3 toros sanos de la raza Brangus, de entre 4 y 5 años de edad, ubicados en el Rancho la Sábila, ubicado en Moyotepec, municipio de Plan de Ayala, en el estado de Morelos; de los cuales se obtuvieron y evaluaron 3 muestras de eyaculado por cada toro seleccionado. Las muestras de semen se mantuvieron a una temperatura de 35° C para su evaluación y hasta su empajillado.

Evaluación de la calidad del semen: 1) Evaluación macroscópica: Volumen, color y aspecto; 2) Evaluación microscópica: Motilidad, volumen y concentración espermática, donde se evaluó el movimiento en masa y el movimiento individual progresivo, así como también la concentración espermática.

Las pruebas a las que se sometieron las muestras de semen fueron las siguientes:

Viabilidad espermática: Se realizarán tinciones no fluorescentes como eosina-nigrosina, para evaluar la viabilidad de los espermatozoides frescos.

Una vez que se evaluaron estos parámetros se procedió a agregar el diluyente, las muestras se dividieron para congelar en 2 medios: Grupo 1 medio *Trilady!*® y Grupo 2 medio *AndroMed*®. Y los

tratamientos (Tx) para cada medio fueron 3: Tx 1 sin antioxidante, Tx 2 con 25 μ M y Tx 3 con 50 μ M, el antioxidante se agrego antes de realizar el empajillado.

Se realizó el protocolo de congelación de acuerdo al diluyente de cada grupo; el empajillado de las muestras se realizó en pajillas de 0.25ml, a una concentración de 20 x 10⁶ células/ml de espermatozoides, se dejaron en un periodo de equilibrio de 4 h a 4°C, posteriormente se realizó la congelación exponiendo las pajillas a vapores de nitrógeno durante 12 minutos, y por ultimo se sumergieron en nitrógeno líquido, las pajillas bien identificadas en bastones se almacenaron en un tanque con nitrógeno líquido. La descongelación se realizó sacando las pajillas y exponiéndolas a temperatura ambiente por 10 segundos y después se colocaron en baño maría a 37°C por 30 segundos.

Al descongelado se realizó la evaluación de la motilidad y la medición de producción de EROs en los espermatozoides de bovino. Las especies reactivas de oxígeno se midieron en mitocondrias frescas utilizando el Amplex Red (Invitrogen, Molecular Probes). La mezcla de reacción con 0,5 mg de proteína/mL en 0,6 M de manitol, 5 mM de MES (pH 6,8), 0,1 M de KCl, 0,5 mM de MgCl₂ y 2 mL/mL de etanol se incubó con oligomicina durante 5 min. A continuación, se utilizó fosfato 0,4mM con 1mM de ADP o 2 mM de ADP, o 600 μ M de EGTA o 600 μ M de Ca²⁺ o 4 mM con 1mM de ATP o 2 mM de ATP o 600 μ M de EGTA o 600 μ M de Ca²⁺, en ambos casos se utilizaron muestras sólo incubadas con fosfato. Después de 1 minuto, la mezcla de reacción de 80 μ l (50 μ g) se colocó en una microplaca de 96 pocillos con una solución de trabajo de 20 μ l (μ M 10 M de rojo Amplex, 0,2 unidades/mL de peroxidasa de rábano picante y 0,2 unidades/mL de superóxido dismutasa en 250 mM de fosfato sódico con pH 7,4), el volumen fue de 100 μ l.

La fluorescencia para EROs (el contenido de EROs se informó en nM) se midió en un detector POLARstar Omega (BGM LABTECH, Offenburg, Alemania) ajustado a 571 y 585 nm. La fluorescencia se detectó después de 30 minutos y los resultados se interpolaron con una curva de calibración.

Se empleó ANOVA de una vía (prueba de comparación múltiple de Dunnett) para comprar las medias de producción de EROs en ambos medios utilizados y en los tratamientos con 2 concentraciones de MitoTEMPO (MT), el Tx 2 (25 μ M) y el grupo 3 (50 μ M), usando GraphPad Prism Versión 5 (GraphPad Software, Inc., La Jolla, CA, EE.UU.), con un valor de $P \leq 0.05$.

4.Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en cuanto a la producción de EROs en este estudio, muestran que existe una menor producción de especies reactivas en ambos medios de congelación *Triladyl*® y *AndroMed*® adiconados con el antioxidante (Tx 2 con 25 μ M y Tx 3 con 50 μ M) con respecto al tratamiento control sin antioxidante, y se observó un aumento de EROs en los espermatozoides congelados en el medio *Triladyl*® (1.82 μ M) (Tabla 1) $P \leq 0.05$.

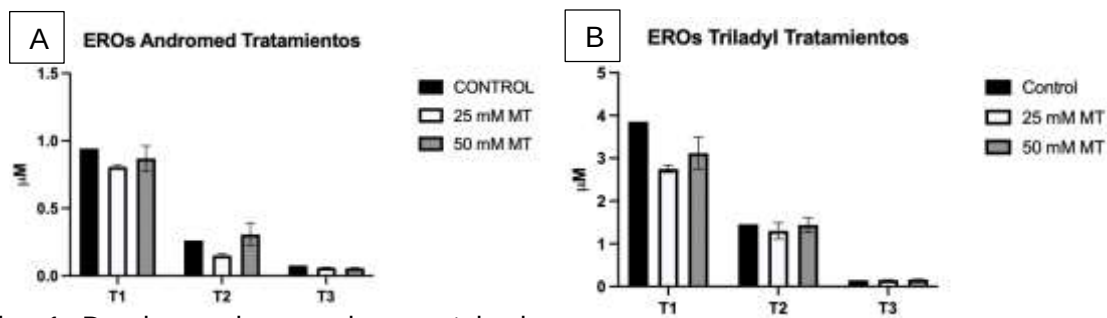
Al hacer una evaluación de los efectos de la adición del antioxidante en cuanto a la producción de EROs (gráfica 1A medio *AndroMed*® y B medio *TriladyL*®) se puede observar en ambas que el Tx 2 presenta menores producciones de especies reactivas lo que representa mejores características en cuanto a la actividad mitocondrial; en donde la concentración del antioxidante redujo la producción de EROs. En este estudio se utilizó MitoTEMPO, un antioxidante dirigido a las mitocondrias, ya que tiene un mecanismo de acción bien documentado a nivel celular. Por lo que los resultados obtenidos podrían deberse a la neutralización del exceso de ROS producidas en el sitio mitocondrial debido al el estrés oxidativo y a la minimización del daño mediado por las ROS que reduce la viabilidad y la fertilidad de los espermatozoides.

TABLA 1. Medición al descongelado de la producción de EROs de espermatozoides de bovinos en dos medios de criopreservación adicionados con diferentes concentraciones de antioxidante

Tratamientos	PRODUCCION EROs μ M	
	ANDROMED	TRILADYL
Sin antioxidante	0.42	1.82
25 mM de MT	0.33	1.40
50 mM de MT	0.41	1.57
Media	0.39	1.59

Tabla 1. Donde se observa el promedio de EROS de los espermatozoides bovinos, obtenido después del proceso de criopreservación adicionando al diluyente diferentes concentraciones del antioxidante (Grupo 1 sin antioxidante, Grupo 2 con 25 μ M y Grupo 3 con 50 μ M).

Gráfica 1. Producción de EROs de los espermatozoides bovinos al descongelado en dos medios de criopreservación adicionados con diferentes concentraciones de antioxidante

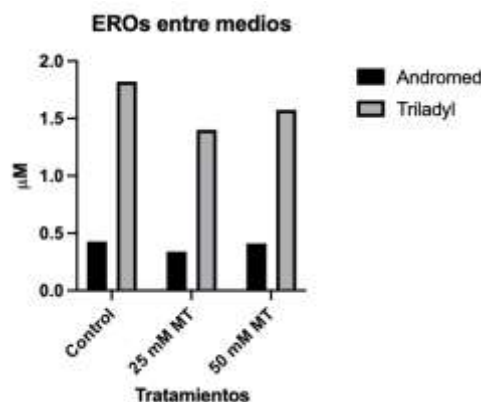


Gráfica 1. Donde se observa el porcentaje de ROS en los espermatozoides bovinos, después del proceso de criopreservación adicionando a los 2 diluyentes comerciales con diferentes concentraciones del antioxidante (Control diluyente sin antioxidante, Tx 2 diluyente con 25µM y Tx 3 diluyente con 50µM de Mito-Tempo). Donde T= promedio de cada toro

Cuando se compararon ambos medios para conocer cuál presenta menor producción de EROs se observa que el diluyente *AndroMed*® presentó menor producción en comparación con el medio *Triladyl*® (gráfica 2), obteniendo diferencias estadísticas significativas entre los diferentes valores.

Se observó una diferencia estadística significativa entre el tratamiento Control de ambos medios (0.42 µM vs 1.82 µM), entre el tratamiento Control del medio *Triladyl* vs. 25 mM MT del medio *Andromed* (1.82 µM vs 0.33 µM); entre el tratamiento Control del medio *Triladyl* vs. 50 mM MT del medio *Andromed* (1.82 µM vs 0.41 µM); entre el tratamiento de 25 mM MT del medio *Andromed* vs. 25 mM MT del medio *Triladyl* (0.33 µM vs 1.40 µM); entre el tratamiento 25 mM MT del medio *Andromed* vs. 50 mM MT del medio *Triladyl* (0.33 µM vs 1.57 µM) y entre el tratamiento 50 mM MT del medio *Andromed* vs. 50 mM MT del medio *Triladyl* (0.41µM vs 1.57 µM).

Gráfica 2. Comparación en la producción de EROs de los espermatozoides bovinos al descongelado en dos medios de criopreservación adicionados con diferentes concentraciones de antioxidante



Como nuevo antioxidante permeable a las células, el MitoTEMPO es un potente crioprotector eficaz para la criopreservación de espermatozoides. En el presente estudio se han determinado los efectos del MitoTEMPO adicionado a dos diluyentes comerciales, sobre la producción de EROs, empleados de manera rutinaria para la criopreservación de espermatozoides de bovino. Se ha comprobado que el MitoTEMPO tiene la capacidad de reducir el estrés oxidativo e inhibir el daño del ADN en varios tipos de células (Hu H., and Li M., 2016; Trnka et al., 2009). Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la concentración de 25 μ M del MitoTEMPO mejoró la producción de EROs en los espermatozoides de bovino criopreservados en el medio *AndroMed*® con respecto al medio *Trilady*®.

El uso de MitoTEMPO en el presente estudio, el cuál es un antioxidante dirigido a las mitocondrias, tiene un mecanismo de acción bien documentado a nivel celular. Por lo que los resultados obtenidos podrían deberse a la neutralización del exceso de EROs producidas en el sitio mitocondrial debido al el estrés oxidativo y a la minimización del daño mediado por las EROs que reduce la viabilidad y la fertilidad de los espermatozoides.

Este estudio pionero en bovinos explora el uso de MitoTempo en la criopreservación del semen bovino, comparando su eficacia en dos diluyentes comerciales. Aunque existen numerosos estudios que analizan diferentes medios para evaluar la viabilidad de los espermatozoides congelados, este es el primero en investigar el uso de este antioxidante específico.

En el caso del búfalo existen reportes del uso del MitoTEMPO, Kumar, A. *et. al.* 2021, reportó que la motilidad progresiva, viabilidad, integridad acrosomal y respuesta a la prueba Hipoosmótica (HOST) así como las anomalías de los espermatozoides mejoraron significativamente ($p < 0,05$) en el semen diluido con el antioxidante a una concentración de 50 μ M, aunque también se observó mejora a 10 y 100 μ M antioxidante. Sin embargo en el estudio antes mencionado no realizaron mediciones en cuanto a la producción de EROs, pero coinciden con los resultados obtenidos con respecto a que una concentración media del antioxidante mostró mejores resultados en los espermatozoides del búfalo.

Se han hecho diferentes estudios en espermatozoides de otras especies como ovino (Zaire, F. *et al.*, 2020) y gallo (Reza, M. *et al.*, 2021); quienes coinciden con los resultados obtenidos por Kumar, A. *et. al.* 2021; reportando que la motilidad de los espermatozoides inmediatamente después de la descongelación fue significativamente mayor con concentraciones de 5 y 50 μ M de MitoTEMPO y que no hallaron diferencias significativas en otras características cinéticas excepto en la motilidad. De igual manera en dichos estudios, no reportan haber realizado una valoración de la producción de EROs como para determinar el efecto del antioxidante adicionado, tal y como lo estamos reportando por vez primera en el espermatozoide de bovino.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran los efectos benéficos de la suplementación con MitoTEMPO sobre la congelación-descongelación de los espermatozoides.

Por lo que el presente estudio demuestra que MitoTEMPO en concentraciones relativamente bajas en los diluyentes comerciales *AndroMed*® como *Trilady*® reduce la producción de especies reactivas en los espermatozoides de bovino, mejorando la calidad del semen después de la descongelación.

Nuestros resultados permiten tener las bases para combinar con otros antioxidantes de origen natural que sean de fácil uso para el proceso de criopreservación de semen en campo, ya que existen estudios recientes que confirman las propiedades antioxidantes, citoprotectoras, mediada por la fuerte capacidad antioxidante, de conjugación y de protección del ADN, tanto de antioxidantes naturales como el *curcumin* (compuesto orgánico natural) así como de los péptidos y residuos de metionina, otro antioxidante empleado en la criopreservación de semen de diferentes especies a nivel veterinario.

Agradecemos el financiamiento de UNAM-DGAPA-PAPIIT (IA206824) y del Programa Interno Cátedras de Investigación de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (CI2468)

6. Bibliografía

1. Azadi L., Tavalae M., Deemeh M.R., et al., 2017. Effects of tempol and quercetin on human sperm
2. Banihani S., Agarwal A., Sharma, R., et al., 2015. Cryoprotective effect of l-carnitine on motility, vitality, and DNA oxidation of human spermatozoa, *Andrologia* 46; 637–641.
3. Fernandez, R. V. (24 de enero de 2022). Biotecnologías reproductivas en el ganado bovino: cinco décadas de investigación en México. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 12(3), 39-78. doi:10.22319/rmcp.v12s3.5918.
4. function after cryopreservation, *Cryo Lett.* 38; 29–36.
5. Gruber, J., Fong, S., Chen, C.B., Yoong, S., Pastorin, G., Schaffer, S., Cheah, I., Halliwell, B. 2013. Mitochondria-targeted antioxidants and metabolic modulators as pharmacological interventions to slow ageing, *Biotechnol. Adv.* 31 563–592.
6. <https://doi.org/10.1111/and.12130>
7. Hu H., and Li M., 2016. Mitochondria-targeted antioxidant mitotempo protects mitochondrial function against amyloid beta toxicity in primary cultured mouse neurons[J], *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 478; 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.07.071>
8. Kumar, A. Gosh, S. 2021. Efecto del diluyente de semen incorporado Mito-Tempo sobre los atributos fisicomorfológicos y la integridad funcional de la membrana de los espermatozoides de búfalo descongelados y congelados. *Criocartas*, vol. 42 (núm. 2), pág. 111-119.
9. Layek, S.S., Mohanty, T.K., Kumaresan, A., Parks, J.E. 2016. Cryopreservation of bull semen: Evolution from egg yolk based to soybean based extenders. *Animal Reproduction Science*, 172, 1-9.
10. Lu, X., Zhang, Y., Bai, H., Liu, J., Li, J., Bin Wu, B. 2017. Mitochondria-targeted antioxidant mitotempo improves the post-thaw sperm quality. *Cryobiology* <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2017.12.009>
11. Marizancén, M. A. (2017). Mejoramiento genético en bovino a través de la inseminación artificial y la inseminación artificial a tiempo fijo. *Revista de Investigación Agraria y Ambienteal*, 8(2), 1-13.
12. Reza, M. Nader, A. 2021. Efectos de la suplementación con extensor de congelación con el antioxidante Mito-Tempo dirigido a las mitocondrias sobre la calidad del semen de gallo congelado y descongelado y el rendimiento reproductivo. *Ciencia de la Producción Animal*, Vol. 225.

13. Salinas, N. (2014). *Efecto de la trehalosa en la fragmentación del ADN en el espermatozoide Bovino*. Argentina: Universidad Católica Argentina.
14. Trnka J., Blaikie F.H., Logan A. et al., 2009. Antioxidant properties of MitoTEMPOL and its hydroxylamine, Free Radic. Res. 43; 4–12. <https://doi.org/10.1080/10715760802582183>
15. Valdez, T. G. (2017). Efecto de diferentes fuentes antioxidantes sobre parámetros celulares y capacitación espermática posdescongelado en semen bovino. *XLI Congreso Nacional de Buiatría* (pág. 8). Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.
16. Zarei, F. Daghigh, H. 2020. Supplementation of ram's semen extender with Mito-TEMPO I: Improvement in quality parameters and reproductive performance of cooled-stored semen. Cryobiology <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2020.10.018>.

Evaluación de la producción de especies reactivas en espermatozoides bovinos criopreservados en dos medios comerciales adicionados con MitoTempo

*Mejía-Flores, I.¹, Hernández-Ignacio, J.², Chiquete-Félix, N.³, Navarrete-García, M.G.¹, Luna-Silva, J.N.¹

¹Universidad Nacional Autónoma de México – Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
Departamento Ciencias Pecuarias. Campo Cuatro, Km. 2.5 Carr. Cuautitlán-Teoloyucan, San Sebastian Xhala, Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, México, C. P. 54714.

²Universidad Nacional Autónoma De México, Departamento de Reproducción FMVZ-UNAM, C.U., CDMX, México, C. P. 04510.

³Universidad Nacional Autónoma De México, Insituto de Fisiología Celular, C.U., CDMX, México, C. P. 04510.

nayazaitmf@cuautitlan.unam.mx, tysonjhi@hotmail.com, nchiquete@ifc.unam.mx,
monymellark12@gmail.com, juliostark54@gmail.com

1.Resumen

El proceso de congelación y descongelación provoca estrés oxidativo y osmótico, choque térmico, formación de hielo intracelular, cambios en la composición lipídica y proteica de la membrana plasmática, disminución de la viabilidad y la motilidad espermática, daños en el acrosoma, la cola y

en las mitocondrias. La mitocondria es la fuente de energía de la respiración y también el principal lugar de generación de especies reactivas del oxígeno (EROs). Las especies reactivas del oxígeno (EROs), tienen la capacidad de alterar reversible o irreversiblemente la función celular. Se ha propuesto que las EROs modifican la bioquímica y la fisiología del espermatozoide. Por otro lado, los antioxidantes pudieran proteger a los espermatozoides del daño producido por las ERO. El objetivo del presente estudio fué evaluar la producción de EROs, por fluorescencia en espectrofotometro, en espermatozoides de bovino criopreservados en presencia de dos tipos de diluyentes comerciales adicionados con 25 μ M y 50 μ M de un antioxidante. Se emplearon 3 toros sanos de la raza Brangus de los cuales se obtuvieron y evaluaron 3 muestras de eyaculado por cada toro, los eyaculados se dividieron para su congelación en 2 medios: Grupo 1 medio *Trilady*® y Grupo 2 medio *AndroMed*®. Las diferentes concentraciones del antioxidante se agregaron al momento del empajillado. Al descongelado se realizó la evaluación de la motilidad y la medición de producción de EROs en los espermatozoides de bovino. Las especies reactivas de oxígeno se midieron en mitocondrias frescas utilizando el Amplex Red y su fluorescencia se midió en un detector POLARstar Omega ajustado a 571 y 585 nm. La fluorescencia se detectó después de 30 minutos y los resulta se interpolaron con una curva de calibración. Se empleó ANOVA de una vía (prueba de comparación múltiple de Dunnett) para comprar las medias de producción de EROs en ambos medios utilizados y en los tratamientos con 2 concentraciones de MitoTEMPO (MT), el Tx 2 (25 μ M) y el grupo 3 (50 μ M), usando GraphPad Prism Versión 5 (GraphPad Software, Inc., La Jolla, CA, EE.UU.), con un valor de $P \leq 0.05$. Los resultados obtenidos, muestran una menor producción de EROs en ambos medios de congelación adiconados con MitoTempo *Trilady*® y *AndroMed*® con 25 μ M (0.33 μ M *AndroMed*® vs 1.40 μ M *Trilady*®) y 50 μ M (0.41 μ M *AndroMed*® vs 1.57 μ M *Trilady*®) con respecto al tratamiento control sin antioxidante (0.42 μ M *AndroMed*® vs 1.82 μ M *Trilady*®), se observó una mayor cantidad de EROs en los espermatozoides congelados en el medio *Trilady*®. Se concluye que la suplementación del antioxidante a una concentración de 25 mM en el diluyente comercial *AndroMed*® (0.33) mejoró la producción de EROs en el esperma bovino congelado-descongelado. Estos resultados respaldan la importancia de utilizar antioxidantes durante la crioconservación del esperma, lo que será muy beneficioso para la IA en términos de producción de ganado bovino.

PALABRAS CLAVES: ANTIOXIDANTE, ESPERMATOZOIDE, CRIOPRESERVACIÓN, ESPECIES REACTIVAS DE OXIGENO.

2.Introducción

En la práctica veterinaria, el uso de biotecnologías reproductivas, como lo es la inseminación artificial (IA), permite mejorar la rentabilidad de las unidades de producción creando un importante avance genético (Marizancén, 2017). El uso de esta tecnología y el potencial en el área de reproducción requirió que se buscaran técnicas como la criopreservación del semen (Fernandez, 2022).

La preservación del material genético del macho es un proceso complejo que requiere el mantenimiento de la calidad inicial del eyaculado y el manejo de la muestra, con el fin de evitar daños irreversibles a la célula espermática (Salinas, 2014).

La crio-preservación induce una serie de cambios funcionales y estructurales a las células espermáticas, en donde la membrana plasmática y la membrana acrosomal externa, sufren algunos daños subletales. Un ejemplo del daño es la capacitación prematura del espermatozoide, la cual ocurre al momento de la congelación/descongelación (Valdez, 2017).

La inducción prematura de la capacitación y reacción acrosomal alteran la función mitocondrial y de este modo se reduce la motilidad espermática (Layek *et al.*, 2016). La mitocondria es la fuente de energía de la respiración y también es el sitio principal de la generación de especies reactivas de oxígeno (EROs). Así mismo, durante los procesos de congelación/descongelación del semen se producen EROs las cuales presentan efectos nocivos para el espermatozoide. El plasma seminal y los espermatozoides presentan un sistema antioxidante que le ayuda a atenuar el daño del estrés oxidativo. Sin embargo, el espermatozoide posee una pequeña porción citoplasmática escasa para generar la protección antioxidante durante el estrés causado por la congelación/descongelación (Valdez, 2017).

Muchos estudios han informado que la suplementación de antioxidantes durante el proceso de congelación del semen puede mejorar la calidad del esperma congelado-descongelado en diversos grados, pero aún existe una falta de un antioxidante eficaz reconocido (Lu, X *et al.*, 2017). Los avances recientes en el estrés oxidativo sugirieron que para intervenir en la producción de ROS deberían de dirigirse directamente a las mitocondrias para lograr actividades antioxidantes eficaces (Gruber *et al.*, 2013). El antioxidante empleado en este estudio, el cual elimina el superóxido de la mitocondria, está compuesto por la unidad de nitróxido de piperidina (TEMPOL) y la fracción lipofílica trifenilfosfonio (TPP), es permeable; pasa rápidamente a través de las membranas de la bicapa lipídica y se acumula masivamente en las mitocondrias energizadas, el sitio principal de generación de EROS. Esto lo convierte en un sensor molecular útil para la detección de la producción de superóxido intracelular, la atenuación de la apoptosis inducida por el estrés y la necrosis (Lu, X *et al.*, 2017).

Hasta ahora, se han realizado pocos estudios sobre los efectos de un antioxidante mitocondrial adicionado MitoTempo en la crioconservación del semen. Por tanto, la evaluación del efecto de añadir este tipo de antioxidante a los medios de crioconservación será muy beneficiosa para la industria de la inseminación artificial bovina.

Dada la importancia de lo anterior expuesto, el objetivo del presente estudio fué evaluar los efectos del antioxidante a diferentes concentraciones sobre la producción de EROs, adiconado al momento de la cripreservación de semen bovino empleando dos diluyentes comerciales; con el objeto de mejorar la capacidad fertilizante en el ganado bovino.

3. Condiciones experimentales

Evaluación del semen: macroscópica y microscópicamente, se evaluaron antes y después de la criopreservación. Se emplearon 3 toros sanos de la raza Brangus, de entre 4 y 5 años de edad, ubicados en el Rancho la Sábila, ubicado en Moyotepec, municipio de Plan de Ayala, en el estado de Morelos; de los cuales se obtuvieron y evaluaron 3 muestras de eyaculado por cada toro seleccionado. Las muestras de semen se mantuvieron a una temperatura de 35° C para su evaluación y hasta su empajillado.

Evaluación de la calidad del semen: 1) Evaluación macroscópica: Volumen, color y aspecto; 2) Evaluación microscópica: Motilidad, volumen y concentración espermática, donde se evaluó el movimiento en masa y el movimiento individual progresivo, así como también la concentración espermática.

Las pruebas a las que se sometieron las muestras de semen fueron las siguientes:

Viabilidad espermática: Se realizarán tinciones no fluorescentes como eosina-nigrosina, para evaluar la viabilidad de los espermatozoides frescos.

Una vez que se evaluaron estos parámetros se procedió a agregar el diluyente, las muestras se dividieron para congelar en 2 medios: Grupo 1 medio *Triladyl*® y Grupo 2 medio *AndroMed*®. Y los tratamientos (Tx) para cada medio fueron 3: Tx 1 sin antioxidante, Tx 2 con 25µM y Tx 3 con 50µM, el antioxidante se agregó antes de realizar el empajillado.

Se realizó el protocolo de congelación de acuerdo al diluyente de cada grupo; el empajillado de las muestras se realizó en pajillas de 0.25ml, a una concentración de 20×10^6 células/ml de espermatozoides, se dejaron en un periodo de equilibrio de 4 h a 4°C, posteriormente se realizó la congelación exponiendo las pajillas a vapores de nitrógeno durante 12 minutos, y por último se sumergieron en nitrógeno líquido, las pajillas bien identificadas en bastones se almacenaron en un tanque con nitrógeno líquido. La descongelación se realizó sacando las pajillas y exponiéndolas a temperatura ambiente por 10 segundos y después se colocaron en baño maría a 37°C por 30 segundos.

Al descongelado se realizó la evaluación de la motilidad y la medición de producción de EROs en los espermatozoides de bovino. Las especies reactivas de oxígeno se midieron en mitocondrias frescas utilizando el Amplex Red (Invitrogen, Molecular Probes). La mezcla de reacción con 0,5 mg de proteína/mL en 0,6 M de manitol, 5 mM de MES (pH 6,8), 0,1 M de KCl, 0,5 mM de MgCl₂ y 2 mL/mL de etanol se incubó con oligomicina durante 5 min. A continuación, se utilizó fosfato 0,4mM con 1mM de ADP o 2 mM de ADP, o 600 µM de EGTA o 600 µM de Ca²⁺ o 4 mM con 1mM de ATP o 2 mM de ATP o 600 µM de EGTA o 600µM de Ca²⁺, en ambos casos se utilizaron muestras sólo incubadas con fosfato. Después de 1 minuto, la mezcla de reacción de 80 µl (50 µg) se colocó en una microplaca de 96 pocillos con una solución de trabajo de 20 µl (µM 10 M de rojo Amplex, 0,2 unidades/mL de peroxidasa de rábano picante y 0,2 unidades/mL de superóxido dismutasa en 250 mM de fosfato sódico con pH 7,4), el volumen fue de 100 µl.

La fluorescencia para EROs (el contenido de EROs se informó en nM) se midió en un detector POLARstar Omega (BGM LABTECH, Offenburg, Alemania) ajustado a 571 y 585 nm. La fluorescencia se detectó después de 30 minutos y los resultados se interpolaron con una curva de calibración.

Se empleó ANOVA de una vía (prueba de comparación múltiple de Dunnett) para comprar las medias de producción de EROs en ambos medios utilizados y en los tratamientos con 2 concentraciones de MitoTEMPO (MT), el Tx 2 (25 μ M) y el grupo 3 (50 μ M), usando GraphPad Prism Versión 5 (GraphPad Software, Inc., La Jolla, CA, EE.UU.), con un valor de $P \leq 0.05$.

4.Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en cuanto a la producción de EROs en este estudio, muestran que existe una menor producción de especies reactivas en ambos medios de congelación *Triladyl*® y *AndroMed*® adiconados con el antioxidante (Tx 2 con 25 μ M y Tx 3 con 50 μ M) con respecto al tratamiento control sin antioxidante, y se observó un aumento de EROs en los espermatozoides congelados en el medio *Triladyl*® (1.82 μ M) (Tabla 1) $P \leq 0.05$.

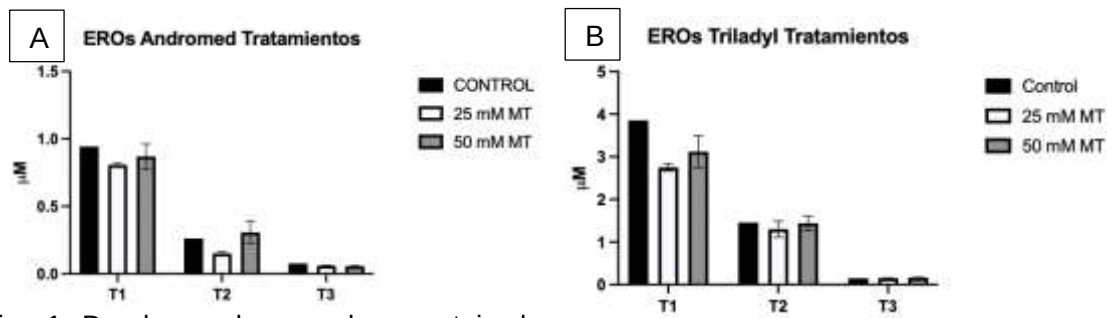
Al hacer una evaluación de los efectos de la adición del antioxidante en cuanto a la producción de EROs (gráfica 1A medio *AndroMed*® y B medio *Triladyl*®) se puede observar en ambas que el Tx 2 presenta menores producciones de especies reactivas lo que representa mejores características en cuanto a la actividad mitocondrial; en donde la concentración del antioxidante redujo la producción de EROs. En este estudio se utilizó MitoTEMPO, un antioxidante dirigido a las mitocondrias, ya que tiene un mecanismo de acción bien documentado a nivel celular. Por lo que los resultados obtenidos podrían deberse a la neutralización del exceso de ROS producidas en el sitio mitocondrial debido al el estrés oxidativo y a la minimización del daño mediado por las ROS que reduce la viabilidad y la fertilidad de los espermatozoides.

TABLA 1. Medición al descongelado de la producción de EROs de espermatozoides de bovinos en dos medios de criopreservación adicionados con diferentes concentraciones de antioxidante

Tratamientos	PRODUCCION EROs μ M	
	ANDROMED	TRILADYL
Sin antioxidante	0.42	1.82
25 mM de MT	0.33	1.40
50 mM de MT	0.41	1.57
Media	0.39	1.59

Tabla 1. Donde se observa el promedio de EROS de los espermatozoides bovinos, obtenido después del proceso de criopreservación adicionando al diluyente diferentes concentraciones del antioxidante (Grupo 1 sin antioxidante, Grupo 2 con 25 μ M y Grupo 3 con 50 μ M).

Gráfica 1. Producción de EROs de los espermatozoides bovinos al descongelado en dos medios de criopreservación adicionados con diferentes concentraciones de antioxidante

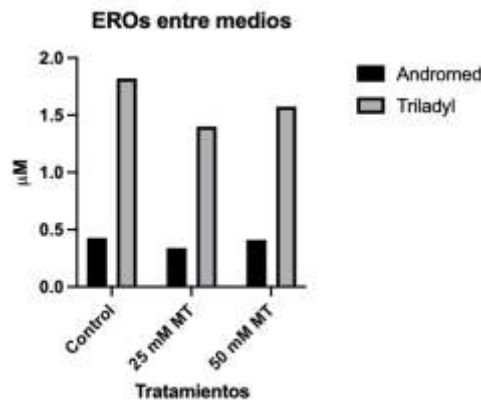


Gráfica 1. Donde se observa el porcentaje de ROS en los espermatozoides bovinos, después del proceso de criopreservación adicionando a los 2 diluyentes comerciales con diferentes concentraciones del antioxidante (Control diluyente sin antioxidante, Tx 2 diluyente con 25μM y Tx 3 diluyente con 50μM de Mito-Tempo). Donde T= promedio de cada toro

Cuando se compararán ambos medios para conocer cuál presenta menor producción de EROs se observa que el diluyente *AndroMed*® presentó menor producción en comparación con el medio *Triladyl*® (gráfica 2), obteniendo diferencias estadísticas significativas entre los diferentes valores.

Se observó una diferencia estadística significativa entre el tratamiento Control de ambos medios (0.42 μM vs 1.82 μM), entre el tratamiento Control del medio *Triladyl* vs. 25 mM MT del medio *Andromed* (1.82 μM vs 0.33 μM); entre el tratamiento Control del medio *Triladyl* vs. 50 mM MT del medio *Andromed* (1.82 μM vs 0.41 μM); entre el tratamiento de 25 mM MT del medio *Andromed* vs. 25 mM MT del medio *Triladyl* (0.33 μM vs 1.40 μM); entre el tratamiento 25 mM MT del medio *Andromed* vs. 50 mM MT del medio *Triladyl* (0.33 μM vs 1.57 μM) y entre el tratamiento 50 mM MT del medio *Andromed* vs. 50 mM MT del medio *Triladyl* (0.41μM vs 1.57 μM).

Gráfica 2. Comparación en la producción de EROs de los espermatozoides bovinos al descongelado en dos medios de criopreservación adicionados con diferentes concentraciones de antioxidante



Como nuevo antioxidante permeable a las células, el MitoTEMPO es un potente crioprotector eficaz para la criopreservación de espermatozoides. En el presente estudio se han determinado los efectos del MitoTEMPO adicionado a dos diluyentes comerciales, sobre la producción de EROs, empleados de manera rutinaria para la criopreservación de espermatozoides de bovino. Se ha comprobado que el MitoTEMPO tiene la capacidad de reducir el estrés oxidativo e inhibir el daño del ADN en varios tipos de células (Hu H., and Li M., 2016; Trnka et al., 2009). Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la concentración de 25 μM del MitoTEMPO mejoró la producción de EROs en los espermatozoides de bovino criopreservados en el medio *AndroMed*® con respecto al medio *Triladyl*®.

El uso de MitoTEMPO en el presente estudio, el cuál es un antioxidante dirigido a las mitocondrias, tiene un mecanismo de acción bien documentado a nivel celular. Por lo que los resultados obtenidos podrían deberse a la neutralización del exceso de EROs producidas en el sitio mitocondrial debido al el estrés oxidativo y a la minimización del daño mediado por las EROs que reduce la viabilidad y la fertilidad de los espermatozoides.

Este estudio pionero en bovinos explora el uso de MitoTempo en la criopreservación del semen bovino, comparando su eficacia en dos diluyentes comerciales. Aunque existen numerosos estudios que analizan diferentes medios para evaluar la viabilidad de los espermatozoides congelados, este es el primero en investigar el uso de este antioxidante específico.

En el caso del búfalo existen reportes del uso del MitoTEMPO, Kumar, A. et al. 2021, reportó que la motilidad progresiva, viabilidad, integridad acrosomal y respuesta a la prueba Hipoosmótica (HOST) así como las anomalías de los espermatozoides mejoraron significativamente ($p < 0,05$) en el semen diluido con el antioxidante a una concentración de 50 μM , aunque también se observó mejora a 10 y 100 μM antioxidante. Sin embargo en el estudio antes mencionado no realizaron mediciones en cuanto a la producción de EROs, pero coinciden con los resultados obtenidos con respecto a que una concentración media del antioxidante mostró mejores resultados en los espermatozoides del búfalo.

Se han hecho diferentes estudios en espermatozoides de otras especies como ovino (Zaire, F. et al., 2020) y gallo (Reza, M. et al., 2021); quienes coinciden con los resultados obtenidos por Kumar, A.

et. al. 2021; reportando que la motilidad de los espermatozoides inmediatamente después de la descongelación fue significativamente mayor con concentraciones de 5 y 50 μM de MitoTEMPO y que no hallaron diferencias significativas en otras características cinéticas excepto en la motilidad. De igual manera en dichos estudios, no reportan haber realizado una valoración de los producción de EROs como para determinar el efecto del antioxidante adicionado, tal y como lo estamos reportando por vez primera en el espermatozoide de bovino.

5.Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran los efectos benéficos de la suplementación con MitoTEMPO sobre la congelación-descongelación de los espermatozoides.

Por lo que el presente estudio demuestra que MitoTEMPO en concentraciones relativamente bajas en los diluyentes comerciales *AndroMed*® como *TriladyI*® reduce la producción de especies reactivas en los espermatozoides de bovino, mejorando la calidad del semen después de la descongelación.

Nuestros resultados permiten tener las bases para combinar con otros antioxidantes de origen natural que sean de fácil uso para el proceso de criopreservación de semen en campo, ya que existen estudios recientes que confirman las propiedades antioxidantes, citoprotectoras, mediada por la fuerte capacidad antioxidante, de conjugación y de protección del ADN, tanto de antioxidantes naturales como el *curcumin* (compuesto orgánico natural) así como de los péptidos y residuos de metionina, otro antioxidante empleado en la criopreservación de semen de diferentes especies a nivel veterinario.

Agradecemos el financiamiento de UNAM-DGAPA-PAPIIT (IA206824) y del Programa Interno Cátedras de Investigación de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (CI2468)

6.Bibliografía

1. Azadi L., Tavalae M., Deemeh M.R., et al., 2017. Effects of tempol and quercetin on human sperm
2. Banihani S., Agarwal A., Sharma, R., et al., 2015. Cryoprotective effect of l-carnitine on motility, vitality, and DNA oxidation of human spermatozoa, *Andrologia* 46; 637–641.
3. Fernandez, R. V. (24 de enero de 2022). Biotecnologías reproductivas en el ganado bovino: cinco décadas de investigación en México. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 12(3), 39-78. doi:10.22319/rmcp.v12s3.5918.
4. function after cryopreservation, *Cryo Lett.* 38; 29–36.

5. Gruber, J., Fong, S., Chen, C.B., Yoong, S., Pastorin, G., Schaffer, S., Cheah, I., Halliwell, B. 2013. Mitochondria-targeted antioxidants and metabolic modulators as pharmacological interventions to slow ageing, *Biotechnol. Adv.* 31 563–592.
6. <https://doi.org/10.1111/and.12130>
7. Hu H., and Li M., 2016. Mitochondria-targeted antioxidant mitotempo protects mitochondrial function against amyloid beta toxicity in primary cultured mouse neurons[J], *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 478; 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.07.071>
8. Kumar, A. Gosh, S. 2021. Efecto del diluyente de semen incorporado Mito-Tempo sobre los atributos fisicomorfológicos y la integridad funcional de la membrana de los espermatozoides de búfalo descongelados y congelados. *Criocartas*, vol. 42 (núm. 2), pág. 111-119.
9. Layek, S.S., Mohanty, T.K., Kumaresan, A., Parks, J.E. 2016. Cryopreservation of bull semen: Evolution from egg yolk based to soybean based extenders. *Animal Reproduction Science*, 172, 1-9.
10. Lu, X., Zhang, Y., Bai, H., Liu, J., Li, J., Bin Wu, B. 2017. Mitochondria-targeted antioxidant mitotempo improves the post-thaw sperm quality. *Cryobiology* <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2017.12.009>
11. Marizancén, M. A. (2017). Mejoramiento genético en bovino a través de la inseminación artificial y la inseminación artificial a tiempo fijo. *Revista de Investigación Agraria y Ambienteal*, 8(2), 1-13.
12. Reza, M. Nader, A. 2021. Efectos de la suplementación con extensor de congelación con el antioxidante Mito-Tempo dirigido a las mitocondrias sobre la calidad del semen de gallo congelado y descongelado y el rendimiento reproductivo. *Ciencia de la Producción Animal*, Vol. 225.
13. Salinas, N. (2014). *Efecto de la trehalosa en la fragmentación del ADN en el espermatozoide Bovino*. Argentina: Universidad Católica Argentina.
14. Trnka J., Blaikie F.H., Logan A. et al., 2009. Antioxidant properties of MitoTEMPOL and its hydroxylamine, *Free Radic. Res.* 43; 4–12. <https://doi.org/10.1080/10715760802582183>
15. Valdez, T. G. (2017). Efecto de diferentes fuentes antioxidantes sobre parámetros celulares y capacitación espermática posdescongelado en semen bovino. *XLI Congreso Nacional de Buiatría* (pág. 8). Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.
16. Zarei, F. Daghigh, H. 2020. Supplementation of ram's semen extender with Mito-TEMPO I: Improvement in quality parameters and reproductive performance of cooled-stored semen. *Cryobiology* <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2020.10.018>.

PARTICIPACIÓN DE EZRINA Y DE CaMKII EN LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBESTRUCTURA DE LA TECA PERINUCLEAR DE LOS ESPERMATOZOIDES DE VERRACO.

Lara-Juárez, E. Reneé¹, Juárez-López, N. Orlando², Gutiérrez-Pérez, Oscar³, Cornejo-Cortés, M. Angel⁴, Córdova-Izquierdo, Alejandro⁵, Juárez-Mosqueda, M. de Lourdes¹

¹Departamento de Morfología, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, CP 04510.,

²Departamento de Genética y Bioestadística, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, CP 04510., ³Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Porcina-

CEIEPP, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, Jilotepec de Molina Enríquez, México, CP 54240.,

⁴Departamento de Ciencias Biológicas, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, México, CP 54740., ⁵Departamento de Producción Agrícola y Animal, Universidad Autónoma de México-Xochimilco, Ciudad de México, CP 04960.

E- mail: mvzreneelara@gmail.com, noeorlando@comunidad.unam.mx, oscargp@comunidad.unam.mx, dr_macornejo_fesc@cuautitlan.unam.mx, acordova@correo.xoc.uam.mx, luerfco@unam.mx

*Proyecto apoyado por la DGAPA-UNAM (PAPIIT IN227423)

1. Resumen

Los espermatozoides deben pasar por una serie de cambios y modificaciones bioquímicas conocidos como capacitación, requisito indispensable para que puedan llevar a cabo la reacción acrosomal (RA). La teca perinuclear (TP) principal estructura citoesquelética de la cabeza del espermatozoide de los mamíferos, presenta una subestructura (sTP) que se mantiene en los espermatozoides capacitados, pero no en los que presentan RA, observándose que la actina filamentosa desempeña un papel importante en la estabilización de la misma. Varios mecanismos pueden proteger al espermatozoide de sufrir la RA espontánea (RAe), de manera específica ezrina media el mecanismo dependiente de PKA/CaMKII. En el presente estudio, investigamos el involucramiento de ezrina y de CaMKII, así como de las fosfatidilinositol 3- y -4 quinasas (PI3K y PI4K) en la estabilidad de la sTP durante la capacitación de los espermatozoides de verraco. La presencia de ezrina en la TP fue identificada por Western blotting y NSC668394 para su inhibición. KN-93 para la inhibición de CaMKII, Wortmannina a las concentraciones de 10nM y 10µM para la inhibición de PI3K y PI4K tipo III, respectivamente y Caliculina para la inhibición de la proteína fosfatasa 1 (PP1). La valoración de la sTP se realizó en espermatozoides desmembrados tratados por el método de tinción negativa para su observación al microscopio electrónico de transmisión. La inhibición de ezrina al igual que la de CaMKII estimuló la pérdida de la sTP, mientras que está permaneció integra en la mayoría de los espermatozoides al inhibir a PI3K, no así al inhibir a PI4K y la PP1. Además, encontramos la existencia de una correlación positiva entre la presencia de acrosoma y la presencia de la sTP.

2. Introducción

Para adquirir la capacidad de fertilizar al óvulo, los espermatozoides de mamífero deben someterse a una serie de procesos y modificaciones bioquímicas en el tracto reproductor femenino, denominados capacitación: lo cual es requisito indispensable para que se pueda llevar a cabo la reacción acrosomal (RA) ^[1].

La Teca Perinuclear (TP) es el principal elemento citoesquelético de la cabeza del espermatozoide de los mamíferos, ésta es una capa densa que envuelve al núcleo

del espermatozoide y entre sus funciones se encuentra el asegurar la estabilidad del acrosoma. La TP presenta una subestructura (sTP) que ha permitido valorar morfológicamente su integridad, observándose que la sTP se mantiene en los espermatozoides capacitados, pero no en los que sufren reacción acrosomal (RA); identificándose a la actina-F con un papel importante en la estabilización de la misma ^[2]. En los espermatozoides de mamífero, se ha propuesto que dos vías median la polimerización de actina ambas dependientes de la proteína quinasa A (PKA): la de la fosfolipasa D (PLD) y la de la quinasa dependiente de calcio-calmodulina (CaMKII) ^[3].

Durante la capacitación espermática, en el espermatozoide de bovino la activación de ezrina (proteína reguladora de actina) evita la RA-e, debido a la formación de actina filamentosa; señalándose como mediadoras de su activación a la cinasa II de calmodulina (CaMKII) y a la fosfatidilinositol-4-cinasa (PI4K). También se menciona que la unión de ezrina a fosfatidilinositol bifosfato (PIP2) estimula su fosforilación/activación y que la inhibición de CaMKII induce la RA-e ^[4]. Ya que la sTP participa en la estabilidad del acrosoma, en el presente trabajo evaluaremos si la proteína ezrina se encuentra presente en el espermatozoide de verraco y de ser así su participa durante el proceso de capacitación en la estabilidad de sPT por la vía de señalización ACs/PKA/Src/CaMKII/PLD involucrada en la regulación del citoesqueleto de actina y su relación con la presencia de acrosoma.

2.1 Objetivo general

El objetivo del presente estudio fue identificar la presencia de ezrina en la TP, así como determinar si durante el proceso de capacitación de los espermatozoides de verraco la proteína participa en la conservación de la integridad de la sTP, y si para ello se requiere PIP₂, la participación de la CaMKII y la inhibición de PP1, además de su relación de la presencia de la sTP con la del acrosoma.

3. Condiciones experimentales

Se utilizó semen de verraco recién eyaculado obtenido mediante la técnica de mano enguantada. Los espermatozoides fueron sometidos a diferentes tratamientos; 1) semen fresco sin capacitar como muestra testigo, y las demás fueron tratadas bajo las siguientes condiciones, 2) Inhibidor de Ezrina (NSC668394) (iE) 20µm, 3) Wortmanina (WT) 10µm, 4) WT 10nM, 5) KN93 50µm, 6) Caliculina (CA) 100nM, 7) Wortmanina (WT) 10nM en combinación con CA, 8) combinación de WT 10µM más CA, 9) iE más CA, 10) semen fresco capacitado y por último, 11) semen fresco capacitado con RA.

Antes de cada tratamiento los espermatozoides fueron lavados con PBS atemperado a 37°C y re-suspendidos a una concentración final de 100x10⁶ espermatozoides/ml en medio de capacitación (NaCl 116mM, KCl 3.10mM, NaHCO₃ 15mM, MgSO₄ 0.40mM, NA₂HPO₄ 0.30mM, glucosa 5mM, hepes 20mM, rojo fenol 50µg/ml, BSA 3mg/ml,

CaCl₂H₂O 4.5mM, lactato de sodio 21.70mM, piruvato de sodio 1mM, gentamicina 100mg/ml), pH 7.4. Se capacitaron por 2 horas a 38.5°C con un 5% de CO₂. En el tratamiento 7 su estado de capacitación fue examinado mediante la capacidad de los espermatozoides de sufrir la RA, la cual fue inducida mediante la adición de 5µM de ionóforo de calcio A23187 y se incubó 30 min más, bajo las mismas condiciones.

Para la exposición de la TP todas las muestras fueron tratadas con detergente Brij 36-T al 10% por 5 minutos, enseguida fueron fijadas en paraformaldehído al 4% para posteriormente ser procesadas para su observación al Microscopio Electrónico de Transmisión (MET), por el método de tinción negativa. La evaluación de la integridad de la TP se realizó mediante el conteo de 20 células, tomando como referencia la sTP, ésta se clasificó como; alterada/ausente e íntegra. Mientras que la evaluación del acrosoma se realizó mediante la tinción de Azul de Coomasie, en la cual se contaron 100 células al microscopio de luz y los resultados se clasificaron con presencia y ausencia de acrosoma. Todas las evaluaciones de cada tratamiento se realizaron por quintuplicado.

La extracción de proteínas se realizó mediante un lavado previo de los espermatozoides con PBS atemperado a 4°C y sometidos a centrifugación a 10,000 rpm por 5 minutos a 4°C para su posterior re-suspensión a una concentración final de 100x10⁶, 200x10⁶ y 300x10⁶ espermatozoides/ml en amortiguador de lisis (Tris-HCl 125mM pH 7.5, SDS 6%, inhibidor de proteasas libre de EDTA 1%, inhibidor de fosfatasas 1%), después de un vortexeo a 15hertz/15min y sometido a centrifugación a 10,000 RFC/5min, se colectó y re suspendió el sobrenadante en amortiguador de muestra 2x a una dilución 1:5. Las muestras se hirvieron por 5 minutos a 100°C y se corrieron en geles de poliacrilamida al 10% (SDS-PAGE).

3.1 Análisis estadístico

Para el análisis de los datos de este estudio se utilizó la versión 4.2.0 del software estadístico R. Se emplearon las librerías *stats* 4.3.2 y *pgirmess* 2.0.3 para llevar a cabo prueba de Kruskal-Wallis (prueba no paramétrica adecuada para comparar múltiples grupos cuando no se cumplen los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza). Se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medianas poblacionales con un nivel de significancia $\alpha \leq 0.05$. Para determinar si existía una correlación entre las evaluaciones, se empleó la prueba del Coeficiente de Correlación de Pearson, aceptándose la hipótesis alternativa de correlación con un nivel de significancia $\alpha \leq 0.05$.

4. Resultados y discusión.

Para identificar si la ezrina se expresa en el espermatozoide de verraco, se realizó un análisis por Western blot de las proteínas espermáticas extraídas de la TP, identificándose una banda de ~85 kDa, consistente con el peso molecular predicho de la proteína (Fig. 1A).

En la Figura 1B se muestra la ultraestructura normal de la sTP, la cual se vio alterada por la incubación de los espermatozoides en el medio de capacitación adicionado con el iE, donde la presencia de la sTP se redujo significativamente ($p < 0.05$) al ser comparados con los espermatozoides no capacitados (Tabla 1); aunque al comparar el grupo con los espermatozoides capacitados no existió una diferencia significativa, si se observó una diferencia numérica (0.2 vs 7.8).

Dado que la activación de ezrina depende de su unión a $\text{PIP}_{2(4,5)}$, para determinar si durante el proceso de capacitación de los espermatozoides de verraco la producción del fosfoinosítido es necesaria para mantener la morfología de la sTP se indujo la inhibición de la fosfatidilinositol-3-cinasa (PI3K) y de la fosfatidilinositol-4- cinasa (PI4K) con el inhibidor WT a las concentraciones de 10nM y 10 μM , respectivamente; ambas enzimas participan en la producción de fosfoinosítidos [5]. Como se muestra en la Tabla 1 la sTP se mantuvo íntegra en un mayor número de espermatozoides (14.6) cuando la PI3K fue inhibida, siendo menor el número cuando PI4K fue inhibida (2.2).



Figura 1. Expresión de la ezrina y morfología de la sTP en el espermatozoide de cerdo. **(A)** Las proteínas de la TP fueron extraídas de muestras espermáticas a diferentes concentraciones y analizadas por Western blot usando un anticuerpo anti-ezrina (3C12, Santa Cruz Biotechnology) diluido 1:200. Línea 1 marcadores de peso molecular; línea 2, 100x10⁶ esp/ml; línea 3, 200x10⁶ esp/ml; línea 4, 300x10⁶ esp/ml. **(B).** Microscopia electrónica de una cabeza espermática de semen fresco mostrando la superficie de la TP. El recuadro muestra un aumento de la sTP. La flecha señala a la sTP.

Aunque no hubo diferencia estadística significativa al comparar el efecto de la inhibición por WT entre ambas cinasas nuestros datos sugieren que posiblemente el $\text{PIP}_{3(3,4,5)}$ producido por la PI3K durante el proceso de capacitación no es importante para la producción de $\text{PIP}_{2(4,5)}$, mientras que la actividad de PI4K si lo sería. A este respecto, en el espermatozoide de bovino se identificó que ambas quinasas participan en el proceso de capacitación, mientras que en los espermatozoides de verraco y de humano se encontró que la PI3K no está involucrada, lo que coincide con nuestros resultados [6, 7]. Por otra parte, WT a la concentración de 10 μM inhibe a la PI4K tipo III, pero no a PI4K

tipo II, que también se expresa en el espermatozoide de verraco [5]; por lo que no descartamos la posibilidad de que el que se mantuviera la integridad de la sPT en un gran número de células se deba a la presencia de este tipo de fosfatidil quinasa, por lo que sería importante valorar su expresión y localización en el espermatozoide del verraco .

Tabla 1. Comparación de la integridad de la sPT de los espermatozoides capacitados de verraco en presencia del inhibidor de ezrina (iE) o con Wortmanina (WT) con la de los grupos testigos (sin capacitar, capacitados, RA). La valuación de la morfología de la sPT se realizó empleando el microscopio electrónico.

COMPARACIÓN ENTRE GRUPOS	sTP íntegra		
	(número promedio)		p-value
Capacitado - Sin capacitar	7,8	14,8	>0,05
Capacitado - RA	7,8	2,2	>0,05
RA - Sin capacitar	2,2	14,8	< 0,05
iE - Sin capacitar	0.2	14,8	< 0,05
iE - Capacitado	0.2	7,8	>0,05
iE – RA	0.2	2,2	>0,05
WT 10μM - WT 10nM	9,4	14,6	> 0,05
WT 10nM – sin capacitar	14,6	14,8	> 0,05
WT 10nM - capacitado	14.6	7,8	> 0,05
WT 10nM - RA	14,6	2,2	< 0,05
WT 10μM – sin capacitar	9,4	14,8	> 0,05
WT 10μM - capacitado	9,4	7,8	> 0,05
WT 10μM - RA	9,4	2,2	> 0,05

p-value < 0.05, existe diferencias entre grupos.

Se conoce que posterior a su unión a $PIP_{2(4,5)}$, ezrina es fosforilada por CaMKII durante el proceso de capacitación, por lo que evaluamos si la actividad de la enzima era esencial para mantener la integridad de la sTP. Como se muestra en la Tabla 2, la inhibición de CaMKII, usando KN-93, causó una reducción significativa ($p < 0.05$) de la sTP en comparación con los espermatozoides no capacitados, mientras que su comparación con los espermatozoides con RA no mostro diferencia ($p > 0.05$), indicativo de que la enzima media la estabilidad de la sTP. En el espermatozoide de humano se reporta que la fosforilación de ezrina se incrementa durante el proceso de capacitación, lo que permite que la proteína regule el proceso de capacitación a través de su asociación a RhoGDII, lo que permite la liberación de RhoA para que promueva la formación de actina-F a través de la vía de la Rho-GTPasa [8].

Tabla 2. Comparación de la estabilidad de la sPT en los espermatozoides capacitados de verraco en presencia del inhibidor KN93 con la de los grupos testigos (sin capacitar, capacitados, RA). La valuación de la morfología de la sPT se realizó empleando el microscopio electrónico.

COMPARACIÓN ENTRE TRATAMIENTOS	sTP íntegra		
	(número promedio)		p-value
KN93 - Sin capacitar	2	14,8	< 0,05
KN93 – capacitado	2	7,8	> 0,05
KN93 – RA	2	2,2	> 0,05

p-value < 0.05, existe diferencias entre tratamientos

Ya que la fosforilación de ezrina y su unión con el PIP₂ estimula su fosforilación/activación [4], para evaluar si la inhibición de la desfosforilación de la proteína podría revertir el efecto del iE y el de WT y con ello mantener la integridad de la sPT en los espermatozoides, las células se capacitaron en presencia de la Caliculina A (CA) un inhibidor de la proteína fosfatasa 1 (PP1) en combinación con el iE o con WT. Los resultados mostraron que la adición del inhibidor de la PP1 redujo la cantidad numérica de espermatozoides con la sTP íntegra de los grupos tratados en comparación con los espermatozoides de los grupos testigos, a excepción del grupo RA (6.4 vs 2.2) (Tabla 3). Es de señalarse que cuando el inhibidor se adicionó solo, el número de espermatozoides con sTP fue mayor (6.4), mientras que cuando se adiciona en combinación con iE o con WT 10nM y 10 μM, el número de células disminuyó (2.8, 0.8, y 4.2, respectivamente). Estos resultados no coinciden con lo reportado por otros investigadores en el espermatozoide de bovino, quienes reportan que la inhibición de la enzima revierte la RAe ocasionada por el iE o por el tratamiento con WT [4, 9]. La CA es un inhibidor altamente específico para PP1[10]. Otros investigadores señalan que CA promueve el movimiento hiperactivado y la RA[11]. En el caso del espermatozoide de verraco, por WB e inmunofluorescencia se ha confirmado la presencia de PP1 en la región postacrosomal de la cabeza y su inactivación por fosforilación en respuesta a la acción de CA [12]. Investigaciones están siendo realizadas para valorar el estado de fosforilación de las proteínas en estudio.

Tabla 3. Comparación de la integridad de la sTP en los espermatozoides capacitados de verraco en presencia caliculina A (CA) sola o en combinación con el iE o WT (10nM y 10μM) con la de los grupos testigos (sin capacitar, capacitados, RA).

COMPARACIÓN ENTRE TRATAMIENTOS	sTP íntegra		
	(número promedio)		p-value
CA - Sin capacitar	6,4	14,8	> 0,05

CA – Capacitado	6,4	7,8	> 0,05
CA – RA	6,4	2,2	> 0,05
iE + CA - Sin capacitar	2,8	14,8	< 0,05
iE + CA – Capacitado	2,8	7,8	> 0,05
iE + CA – RA	2,8	2,2	> 0,05
WT 10μM + CA / Sin capacitar	0,8	14,8	< 0,05
WT 10μM + CA / Capacitado	0,8	7,8	> 0,05
WT 10μM + CA / RA	0,8	2,2	> 0,05
WT 10nM + CA / Sin capacitar	4,2	14,8	> 0,05
WT 10nM + CA / Capacitado	4,2	7,8	> 0,05
WT 10nM + CA / RA	4,2	2,2	> 0,05

p-value < 0.05, existe diferencias entre grupos.

De manera importante, se confirma la existencia de una correlación positiva entre la presencia de acrosoma y la presencia de la sTP ($r= 0.897127017$) (Figura 2), por lo que la comparación de la presencia del acrosoma entre grupos mostró la misma tendencia a lo observado al evaluar a la sTP.

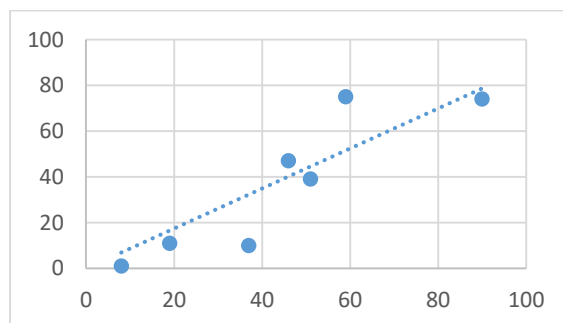


Figura 2. Relación entre la presencia de acrosoma e integridad de la sTP.

5. Conclusión.

Los datos obtenidos indican que durante la capacitación del espermatozoide de verraco la actividad de ezrina es necesaria para mantener la integridad de la TP y con ello conservar a la spT integra y evitar la RA-e. Además de que la inhibición de CaMKII, utilizando KN-93, causa una reducción significativa de sTP, lo que indica su posible

participación en la fosforilación/activación de la ezrina, mientras que la inhibición de PI3K no indujo la pérdida de la sTP, pero si la inhibición de γ PI4K tipo III por WT.

6. Bibliografía.

1. Hirohashi N., Yanagimachi R., 2018. Sperm acrosome reaction: it's site and role in fertilization. *Biol Reprod* 99: 127-133.
2. Mújica. A., Navarro. F., Hernández O., Juárez M., 2003. Perinuclear theca during spermatozoa maturation leading to fertilization. *Microscopy Research and Technique*, 61: 76-87.
3. Shabtay O., Breitbart H. 2016. CaMKII prevents spontaneous acrosomal exocytosis in sperm through induction of actin polymerization. *Dev Biol.*, 415: 64-74.
4. Huta Y., Nitzan Y., Breitbart H. 2020. Ezrin protects bovine spermatozoa from spontaneous acrosome rection. *Theriogenology*; 151: 119-127.
5. Etkovitz N., Rubinstein S., Daniel L., Breitbart H. 2007. Role of PI3-Kinase and PI4-Kinase in actin polymerization during bovine sperm capacitation. *Biol. Reprod.*, 77: 263-273.
6. Nuac V., Lamirande E., Leclerc P., Gagnon C. 2004. Inhibitors of phosphoinositides 3-kinase, LY294002 and wortmannin affect sperm capacitation and associated phosphorylation of protein: Ca^{2+} -dependent divergences. *J Androl.*, 25:573-585.
7. Aparicio I.M., Bragado M.J., Gil M.C., García-Herreros M., Gionzáez-Fernandez I., Tapia J.A., Garcia-Marin L.J. 2007. Phophatidylinositol 3-kinase pathway regulates sperm viability but not capacitation on boar spermatozoa. *Mol. Reprod. Dev.*, 74: 1035-1042.
8. Wang L., Chen W., Zhao C., Hou X., Gou X.J., Lin M., Huang X.H., Mao Y.D., Zhou Z.M., Sha J.H. 2010. The role of ezrin-associated protein network in human sperm capacitation. *Asian Journal of Andrology.*, 12: 667-676.
9. Rotfel H., Hillman P., Ickowics D., Breitbart H. 2014. PKA and CaMKII mediated PI3K activation in bovine sperm by inhibition of the PKC/PP1 cascade. *Repro. Fert.*, 147: 347-356.
10. Rotman T., Etkovitz N., Spiegel A., Rubinstein S, B. 2010. Protein kinase A and protein kinase C (α)/PPP1CC2 play opposing roles in the regulation of phosphatidylinositol 3-kinase in bovine sperm. *Reprod.*, 140: 43-56.
11. Signorelli J.R., Díaz E.S., Fara K., Barón L., Morales P. 2013. Protein Phosphatases Decrease Their Activity during Capacitation: A New Requirement for This Event *PLoS ONE* 8(12): e81286. doi:10.1371/journal.pone.0081286
12. Adachi J, Tate S, Miyake M, Harayama H (2008) Effects of protein phosphatase inhibitor calyculin a on the postacrosomal protein serine/threonine phosphorylation state and acrosome reaction in boar spermatozoa incubated with a cAMP analog. *J Reprod Dev* 54: 171–176.