



Ingeniantes®

Año 11, No.2, Vol.1

Revista de Investigación . Instituto Tecnológico Superior de Misantla

latindex
ISSN 2395-9452

Tierra, Energía, Biológicos, Bioquímica,
Medio Ambiente, Gestión Educativa,
Mecánica de Materiales,
Ciencias de la Computación,
Calidad y Sistemas de Manufactura

Ingeniantes latindex

Año 11 / No. 2 / Vol. 1

Información Legal

Ingeniantes, Año 11, No. 2, Vol 1. diciembre 2024 - junio 2025 - es una publicación semestral editada y publicada por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, teléfono 01 (235) 323 60 18, página web citt.itsm.edu.mx. Editor responsable: Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-062512501200-203, ISSN 2395-9452, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología del ITSM, Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, fecha de última modificación, 20 de diciembre de 2024.

Actualmente indexada en la base de datos del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal LATINDEX, con número de registro 22843.

Se autoriza cualquier reproducción parcial de los contenidos o imágenes de la publicación siempre y cuando sea sin fines de lucro y para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente dando los créditos a los autores del artículo.

El contenido de los artículos publicados es responsabilidad de los autores y no representa el punto de vista del editor de la Revista Ingeniantes.

Cuerpo Editorial

Editor General
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
Editor
L.M. Jorge Obdulio Gerón Borjas
Coeditor
Lic. Erik Balderas González

Administración

M.I.I. Mayra Lizeth Méndez Oloarte

Propiedad Intelectual

Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología
L.M. Jorge Obdulio Gerón Borjas

Sistemas

Administrador de Sistemas
M.S.C. Fernando Alberto Hernández Guevara
Webmaster
L.I. Ana Marcela Gutiérrez Romero

Distribución

Publicación electrónica disponible en
citt.itsm.edu.mx/ingeniantes
Correo electrónico:
revista.ingeniantes@itsm.edu.mx
<https://www.latindex.org/latindex/ficha/22843>

Directorio

M.G.E. Jorge Alberto Lara Gómez

Director General, ITSM, Veracruz, México

Mtro. Arturo Olguin Hernández

Director Académico, ITSM, Veracruz, México

Lic. Julio Cesar Rosas Cruz

Director de Planeación y Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Dr. Luis Alfonso Landero Hernández

Subdirector Académico, ITSM, Veracruz, México

Lic. Adriana López Trujillo

Subdirectora de Planeación, ITSM, Veracruz, México

Dra. María Cristina López Méndez

Subdirectora de Posgrado e Investigación, ITSM, Veracruz, México

M.C.E. Lidia Herrera Domínguez

Subdirectora de Vinculación, ITSM, Veracruz, México

L.A.E. Laura Eugenia Hernández Pérez

Subdirectora de Servicios Administrativos, ITSM, Veracruz, México

Comité de Revisión

Dr. Luis Eduardo Velázquez Contreras, US	SNII	Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT	SNII
Dr. Luis Alberto Morales Rosales, UMSNH	SNII	Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín, ITO	SNII
Dr. Jesús P. Xamán Villaseñor, CENIDET	SNII	Dr. Luis Enrique García Santamaría, ITSM	SNII
Dr. Abel García Barrientos, UASLP	SNII	Dr. Alan Rico Barragán, ITSM	SNII
Dr. David Lara Alabazares, ITSM	SNII	Dra. Alicia Martínez Rebollar, CENIDET	SNII
Dr. Gregorio Fernández Lambert, ITSM	SNII	Dr. Luis Mejía Macario, ITSM	SNII
Dra. Susana López Cuenca, ITSDZ	SNII	Dr. Alfredo Alberto Morales Tapia, UV	SNII
Dr. Javier Esquer Peralta, UNISON	SNII	Dra. María Victoria Carreras Cruz, UP	
Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT	SNII	Dr. Ramón Álvarez López, UDG	
Dr. Eduardo Mael Sánchez Coronado, ITCV	SNII	Dr. Gustavo Martínez Castellanos, ITSM	
Dr. Jesús Antonio Álvarez Cedillo, IPN	SNII	Dr. Arturo Cabrera Hernández, ITSM	
Dr. Roberto Ángel Meléndez Armenta, ITSM	SNII	Dr. Saúl Santiago Cruz, ITSM	
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez, CENIDET	SNII	Dr. Joel Pozos Osorio, HUB2i	
Dr. José Jasson Flores Prieto, CENIDET	SNII	Dra. Ana Lilia Sosa y Durán, ITSM	
Dr. Adolfo Preciado Quiroz, ITSDZ	SNII	Dr. Guillermo Alfredo Arriola Carrera, UX	
Dr. José Luis Marín Muñiz, CV	SNII	Dr. Modesto Raygosa Bello, ITO	
Dr. Sergio Fabian Ruiz Paz, UNPA	SNII	Dr. Luis Alberto Nava Ordoñez, UPAEP	
Dr. Julio César Chacón Hernández, UAT	SNII	Dr. Irahán Otoniel José Guzmán, ITSM	
Dr. Eddy Sánchez de la Cruz, ITSM	SNII	Dr. Humberto Raymundo González Moreno, ITSM	
Dra. María Cristina López Méndez, ITSM	SNII	Dra. María Guadalupe Montes de Oca, ITSM	
Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo, ITSM	SNII	M.C. Clovis Nchikou, ITNL	
Dr. José de Jesús Ibarra Montalvo, ITSDZ	SNII	M.I. Fernando Jurado Pérez, ITESI	
Dr. Andrés Blanco Ortega, CENIDET	SNII	M.I.I. Aarón Montiel Rosales, ITSPR	
Dr. Juan Carlos González Hernández, ITM	SNII	M.I.I. Nayeli Montalvo Romero, ITSPR	
Dr. Heriberto Esteban Benito, ITSNa	SNII	M.I.I. Gema del Carmen Jiménez Gómez, ITSAV	
Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV	SNII	M.I.I. Mario Pérez Acosta, ITSM	
Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro, UV	SNII	M.I.I. Leonardo Martínez Lara, ITSAV	
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, CENIDET	SNII	M.S.C. Arnulfo Gamaliel Hernández González, ITSM	
Dr. Daniel Martínez Navarrete, ITSAV	SNII	M.I.M. Jorge Roa Díaz, ITSM	
Dra. Laura Celina Ruelas Monjardín, UV	SNII	M.C. Vladimir Zagoya Juarez, ITSM	
Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV	SNII	M.G.C. Eduardo Gutierrez Almaraz, ITSM	
Dr. Sergio Fabian Ruiz Paz, UNPA	SNII	M.I.I. Giovanni Luna Chontal, ITSM	
Dr. Arturo Pacheco Espejel, IPN	SNII	M.A. Luz del Carmen Muñoz Palacios, UTCV	
Dr. Cuauhtémoc Guerrero Dávalos, UMSNH	SNII	M.C. Joel Maurilio Morales García, ITSM	

Ingeniantes



03



12



21



29



35

Contenido

Gamificación y Aula Invertida con Kahoot: Transformando el Aprendizaje en Cálculo Diferencial e Integral _____ 03

Gabriela Godínez Dietrich; Jorge Alberto Rodríguez Castro; Rosalía Buenrostro Arceo; Ma. Guadalupe Fernández Luna; María Elena Olivares Pérez, Universidad de Guadalajara

Evaluación del dominio del método directo y cambio de variable en cálculo integral: Un estudio de caso en estudiantes de Ingeniería en Gestión Empresarial _____ 12

Elda Jacinto Martínez; Yesenia González Cruz; Beatriz Cupido Pimentel, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Las Choapas

Efecto fitotóxico de detergente y bismuto sobre la germinación y crecimiento inicial de Melotria scabra (sandía de ratón) _____ 21

Arturo Cabrera Vázquez, Escuela de Bachilleres Artículo Tercero, José Guillermo Franzua Perdomo, Arturo Cabrera Hernández, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de la lechada cemento hidráulico con polietiléntereftalato (PET) _____ 29

Raúl Enrique Contreras Bermúdez; Stefany Pamela Villegas Zenil, Universidad Veracruzana / Zona Poza Rica-Tuxpan; Heriberto Esteban Benito, Instituto Politécnico Nacional de México / CIIEMAD; Alejandra Velasco Pérez; Tania García Herrera, Universidad Veracruzana / Zona Orizaba-Cordoba

Influence of the filler metal on the microstructure of a 2507 superduplex stainless steel multipass welding _____ 35

Doris Ivette Villalobos Vera; Ivan Mendoza Bravo; Gabriela Valerio Canales, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Veracruz

Ingeniantes



41



47



56



65



73

Sistema híbrido para detección oportuna de incendios en vehículos automotrices _____ 41
Arturo Paniagua Balcázar; Esaú Muñoz Ordóñez; Joseph Christopher Zuart Morales; Emmanuel Yoc Solís, Universidad
Politécnica de Tapachula

Análisis de generación y composición de los Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Mo-
tutl, Yucatán _____ 47
Fernando Canul Bacab; José Antonio Alonzo Pacheco; Pedro Ezequiel May Hoil; Claudia Guadalupe Dzib Pool, Tecnológi-
co Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Motul

Perspectivas estratégicas del Litio en México: potencial económico y desafíos industriales
_____ 56
M.L. Quemada-Villagómez; L.I. Quemada-Villagómez; H. Jiménez-Islas; J.J. Villegas-Saucillo, Tecnológico Nacional de
México en Celaya; N.L. Flores-Martínez, Universidad Politécnica de Guanajuato

Aplicación web adaptativa para la monitorización y graficación de datos en tiempo real _ 65
Erica María Lara Muñoz; Israel Viveros Torres, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Alvarado

Modelo de Procesos Logísticos en agencias aduanales usando Herramientas de Ingeniería
de Software _____ 73
Javier Guzmán Obando; Rocío Estela Reyna Rodríguez; Nora Hilda González Durán; Juan Carlos Guzmán García, Univer-
sidad Autónoma de Tamaulipas



Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Gamificación y Aula Invertida con Kahoot: Transformando el Aprendizaje en Cálculo Diferencial e Integral



Colaboración

Gabriela Godínez Dietrich; Jorge Alberto Rodríguez Castro; Rosalía Buenrostro Arceo; Ma. Guadalupe Fernández Luna; María Elena Olivares Pérez, Universidad de Guadalajara

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2024

RESUMEN: Este estudio examina la efectividad de la metodología del aula invertida combinada con la herramienta Kahoot para mejorar el rendimiento académico y la motivación de estudiantes en el curso de Cálculo Diferencial e Integral en la Universidad de Guadalajara. Se utilizó una metodología cuantitativa descriptiva, involucrando a 25 estudiantes de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica. Para medir el impacto, se aplicaron un pretest y un posttest, ambos consistentes en un examen de 22 preguntas de opción múltiple, permitiendo establecer una línea base y evaluar el rendimiento tras la implementación de las estrategias pedagógicas. Además, se utilizó una guía de observación para recopilar datos cualitativos sobre la participación estudiantil, asignando puntuaciones en una escala del 0 al 3. Se diseñó un cuestionario estructurado con una escala de Likert para evaluar percepciones sobre el aprendizaje y la efectividad de Kahoot, administrado al final del ciclo académico. Los resultados mostraron un aumento significativo en el rendimiento académico, con un promedio que pasó del 54.84% en el pretest al 68.00% en el posttest, evidenciando así el impacto positivo de estas metodologías innovadoras en el aprendizaje activo y colaborativo.

PALABRAS CLAVE: Rendimiento académico, aula invertida, gamificación, Kahoot, motivación.

ABSTRACT: This study examines the effectiveness of the flipped classroom methodology combined with the Kahoot tool to improve academic performance and motivation among students in the Differential and Integral Calculus course at the University of Guadalajara. A descriptive quantitative methodology was used, involving 25 students from the Engineering program in Communications and Electronics. To measure the impact, a pretest and a posttest were administered, both consisting of a 22-question multiple-choice exam, allowing for the establishment of a baseline and evaluation of performance after the implementation of pedagogical strategies. Additionally, an observation guide was used to collect qualitative data on student participation, assigning scores on a scale from 0 to 3. A structured questionnaire with a Likert scale was designed to assess perceptions of learning and the effectiveness of Kahoot, administered at the end of the academic cycle. The results showed a significant increase in academic performance, with an average rising from 54.84% in the pretest to 68.00% in the posttest, thus evidencing the positive impact of these innovative methodologies on active and collaborative learning.

KEYWORDS: Academic performance, flipped classroom, gamification, Kahoot, motivation.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías emergentes han transformado diversos sectores, incluido el educativo, donde los métodos de enseñanza tradicionales están siendo reemplazados por enfoques más innovadores. En este contexto, la metodología del aula invertida permite a los estudiantes acceder a materiales de aprendizaje antes de la clase, facilitando así un enfoque más profundo en la aplicación y comprensión del contenido durante las sesiones presenciales. Esta metodología fomenta un ambiente activo y colaborativo, donde los estudiantes pueden plantear dudas y trabajar en la resolución de problemas en conjunto [1].

Para validar el repaso de los temas antes de las clases sincrónicas, se incorpora Kahoot, una herramienta digital que utiliza la gamificación para hacer el aprendizaje más dinámico. A través de cuestionarios interactivos, Kahoot permite a los estudiantes revisar conceptos clave de manera entretenida, promoviendo la participación activa y proporcionando retroalimentación inmediata sobre su comprensión. Esta dinámica no solo incrementa la motivación, sino que también mejora la comunicación entre los estudiantes [2].

En la actualidad el uso de estas metodologías activas en el aula, aparte de favorecer el Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA), proporciona a los estudiantes los conocimientos, las habilidades y las destrezas esenciales para desenvolverse “en un mundo donde el cambio es la única constante y donde las características que nos hacen más humanos (colaboración, creatividad, pasión, entre otras) cobran una mayor importancia” [3].

La necesidad de modernizar las aulas [4] ha sido enfatizada en estudios recientes, especialmente tras la pandemia del COVID-19, que obligó a implementar modalidades educativas alternativas. La enseñanza centrada en el aprendizaje activo, respaldada por nuevas tecnologías como Kahoot, se ha convertido en una estrategia eficaz para mantener a los estudiantes comprometidos y motivados. Diversas investigaciones han demostrado que el uso de plataformas interactivas puede abordar la falta de motivación en el aprendizaje y facilitar el desarrollo de habilidades tanto intelectuales como emocionales. “En el ámbito educativo existe la necesidad de modernizar las aulas, acorde a las necesidades del contexto” [5].

En los últimos cinco años el puntaje con el que han ingresado los alumnos a la Licenciatura de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI) ha ido disminuyendo, lo que supone que las estrategias de enseñanza propuestas en el nivel medio

superior no han sido adecuadas, tal como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Puntajes mínimos de admisión de la Licenciatura de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica (CUCEI).

Calendario	Puntaje mínimo
2019B	135.0133
2020A	140.0933
2020B	81.0000 (solo se consideró el promedio de preparatoria)
2021A	78.0000 (solo se consideró el promedio de preparatoria)
2021B	140.3333
2022A	128.1667
2022B	138.0800
2023A	123.8867
2023B	129.8267
2024A	98.0000

Fuente: Elaboración propia. Consultado de escolar UdeG [6].

Muchos estudiantes provienen de sistemas educativos que pueden no estar suficientemente preparados para abordar las exigencias matemáticas de una licenciatura. La falta de un enfoque sólido en álgebra elemental durante la educación media superior puede resultar en una base insuficiente para los conceptos más avanzados que se enseñan en la universidad. Esto se refleja en el desempeño académico inicial, ya que los estudiantes llegan con carencias significativas en habilidades matemáticas fundamentales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio tiene como objetivo general analizar cómo la implementación de la metodología del aula invertida, junto con el uso de Kahoot, influye en el rendimiento académico de los estudiantes en Cálculo Diferencial e Integral.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Evaluar el impacto del aula invertida en la motivación y participación activa de los estudiantes.
2. Determinar la efectividad de Kahoot como herramienta para fomentar el aprendizaje colaborativo.
3. Identificar las percepciones estudiantiles sobre el uso de recursos didácticos en el aula invertida y su relación con la comprensión matemática.

Para evaluar el impacto de esta estrategia, se aplicó una metodología cuantitativa descriptiva y se empleó un tipo de muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando un grupo de 25 alum-

nos del primer semestre de la carrera de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica (INCE) del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI) de la Universidad de Guadalajara.

A continuación, se describen los instrumentos específicos utilizados para medir las variables del estudio.

Variable independiente: Metodología del aula invertida.

Variable dependiente: Rendimiento académico.

Herramienta tecnológica: Uso de Kahoot.

Para evaluar el impacto del aula invertida, se llevó a cabo una evaluación diagnóstica (pretest) al inicio del curso de Cálculo Diferencial e Integral, la cual consistió en un examen compuesto por 22 preguntas de opción múltiple. Este examen tuvo como objetivo establecer una línea base sobre los conocimientos previos de los estudiantes antes de la implementación de la metodología del aula invertida.

Al finalizar el ciclo académico, se aplicó un segundo examen para evaluar el rendimiento del grupo (posttest) tras la implementación de dicha metodología, complementada por el uso de la herramienta Kahoot. Esta comparación entre el examen diagnóstico inicial (pretest) y el examen final (posttest) permite observar posibles diferencias en el aprovechamiento académico de los estudiantes, proporcionando evidencia sobre la efectividad de las estrategias pedagógicas empleadas. En este contexto, el rendimiento de los estudiantes fue agrupada en cinco grupos de acuerdo con el criterio establecido de notas de la Universidad de Guadalajara (UdeG), ver Tabla 2.

Tabla 2. Escala para evaluar el rendimiento del grupo.

Rango	Interpretación
[0-59]	Insuficiente
[60-69]	Satisfactorio
[70-79]	Bueno
[80-89]	Muy bueno
[90-100]	Excelente

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la efectividad del Kahoot, se empleó una guía de observación para registrar datos cualitativos sobre la participación y el rendimiento de los estudiantes durante las sesiones.

Se asignaron puntuaciones en una escala del 0 (nunca) al 3 (siempre) para cada indicador, lo que permitió cuantificar el comportamiento observado en cinco dimensiones. Los criterios considerados para esta guía de observación se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Guía de observación.

Categoría	Indicadores	Escala			
		0	1	2	3
Participación (PA)	Participa de manera activa en la clase				
	Muestra interés por cumplir los objetivos en la clase				
Involucramiento (IN)	Contribuye con ideas para la solución de los ejercicios				
	Comparte ideas que permiten dar solución a los ejercicios				
Trabajo en equipo (TE)	Fomenta retroalimentación en su equipo				
	Respeto la diferencia de opiniones				
	Facilita el cambio de roles entre los miembros del equipo				
Compromiso (CO)	Durante el desarrollo hace sugerencias para mejorar los resultados del trabajo				
	Mantiene un ánimo positivo para la realización del trabajo				
Desempeño (DS)	Muestran actitud proactiva durante la clase				
	Externa sus ideas y escuchan de manera atenta				
	Asiste a clases de manera puntual				
	Entrega las tareas en tiempo y forma				

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, para identificar la percepción del aprendizaje y la efectividad de la metodología implementada, se diseñó un cuestionario estructurado que fue administrado de manera individual a los 25 estudiantes participantes a través de Formularios de Google.

Se utilizó una escala de Likert diseñada con valoración ordinal que oscila desde 1 (totalmente en desacuerdo) a 5 (totalmente de acuerdo) para medir las respuestas en 14 ítems, donde los estudiantes podían expresar su grado de acuerdo o desacuerdo con afirmaciones relacionadas con su experiencia de aprendizaje. De estos ítems, 11 eran de selección múltiple y 3 eran preguntas abiertas. Por ejemplo, se preguntó sobre la utilidad de Kahoot en el aprendizaje y la percepción general sobre el ambiente de clase (véase Tabla 4).

Tabla 4. Datos comparativos.

Ítems	Pregunta	Opción de pregunta
P01	La herramienta Kahoot te permite aprender mejor los contenidos de un tema de una manera más dinámica.	Múltiple
P02	Los recursos didácticos (apuntes PDF, videos, tareas, etc.) fueron de utilidad para comprender los conceptos básicos del tema.	Múltiple
P03	La herramienta Kahoot fomenta la participación de los estudiantes.	Múltiple
P04	Con la herramienta Kahoot las clases resultan más entretenidas y dinámicas.	Múltiple
P05	La herramienta Kahoot implica agilidad y concentración por parte de los estudiantes.	Múltiple
P06	La herramienta Kahoot compromete al estudiante con su formación de manera activa.	Múltiple
P07	La herramienta Kahoot fomenta la motivación en los estudiantes para aprender más sobre el tema.	Múltiple
P08	La herramienta Kahoot mejora la comunicación y el trabajo en equipo.	Múltiple
P09	La obtención de puntos y recompensas te motiva a esforzarte para superar a tus compañeros.	Múltiple
P10	La herramienta Kahoot favorece a la mejora del ambiente en el aula.	Múltiple
P11	En escala del 1 al 5 (Donde 1 es el mínimo y 5 es el máximo). Después de la herramienta Kahoot en el aula, ¿Cómo calificarías tu experiencia de aprendizaje?	Múltiple
P12	¿Qué es lo que más te ha gustado de la herramienta Kahoot?	Abierta
P13	¿Qué es lo que menos te ha gustado de la herramienta Kahoot?	Abierta
P14	En tu opinión ¿Tienes alguna sugerencia que permita mejorar la herramienta Kahoot en el aula?	Abierta

Fuente: Elaboración propia.

Para contextualizar a los estudiantes, se asignó una sesión para explicar el uso de la plataforma Kahoot y la metodología de aula invertida. Esto se hizo para asegurar que los alumnos comprendieran su rol dentro de la estrategia.

Ahora bien, para la implementación de la metodología del aula invertida, junto con el uso de Kahoot, el proceso didáctico que se aplicó en la materia de Cálculo Diferencial e Integral se llevó a cabo en tres momentos:

1. Planeación. La creación del Kahoot: Se crearon ejercicios sobre diversos temas de cálculo en la plataforma Kahoot que se utilizó como una herramienta tecnológica para aplicar los conocimientos adquiridos. Al mismo tiempo se llevó a cabo una evaluación diagnóstica (pretest) al inicio del curso.

2. Fase interactiva. Para implementar la estrategia de aula invertida, se formaron 5 equipos de 5 integrantes cada uno, elegidos por el profesor con anticipación y conservados a lo largo de toda la dinámica, los lineamientos establecidos por el profesor fueron respetados por cada grupo. Cada grupo utilizó un celular con conexión a internet en el CUCEI para iniciar la sesión en Kahoot usando el PIN del juego proporcionado por el docente. Cada ronda consta de 15 preguntas las cuales tenían que ser resueltas en grupo en la aplicación de Kahoot. Al final de cada ronda, el equipo que terminaba en el primer lugar del ranking de Kahoot era considerado ganador, motivando así a los equipos en las primeras tres posiciones a mejorar en las siguientes rondas. Aquí se empleó la guía de observación por parte del docente, para registrar la participación y el rendimiento de los estudiantes durante cada sesión.

3. Cierre y evaluación. En esta etapa, se aplicó un formulario de evaluación de 11 ítems en escala Likert a los alumnos para conocer su percepción sobre el aprendizaje, los recursos didácticos, la participación, la diversión y el trabajo en equipo, así como su valoración sobre la implementación del modelo de aula invertida. También se documentaron notas sobre la participación y el rendimiento a lo largo de todas las sesiones.

Finalmente, se aplicó un segundo examen para evaluar el rendimiento del grupo (postest) tras la implementación de dicha metodología.

Los resultados obtenidos tanto en el pretest, postest, del cuestionario de la escala de Likert y de la guía de observación se analizan en la sección de resultados, donde se exponen e interpretan los hallazgos.

RESULTADOS

El procesamiento de los datos se realizó con el uso del software estadístico Jamovi 2.2.5. que permite la realización de análisis estadístico, la manipulación de datos, su cálculo y la creación de gráficas.

Como parte de los resultados y con el objeto de valorar la confiabilidad del cuestionario se realizó el índice α de Cronbach de las 11 preguntas tipo Likert, obteniendo un resultado para la muestra total de 0.9495, que se considera un resultado aceptable; por tanto, la confiabilidad es el grado en el que un instrumento produce resultados consistentes y coherentes [7] (véase Tabla 5). Comprobada la fiabilidad, se procedió al estudio descriptivo utilizando medias, desviaciones estándar y porcentajes de los ítems.

Tabla 5. Estadísticas de confiabilidad de la muestra.

	α de Cronbach
Muestra	0.9495

Fuente: Elaboración propia.

Para examinar si los elementos del cuestionario están realmente correlacionados y dar solidez de las relaciones entre los ítems, enseguida en la Figura 1, se observa la correlación de Pearson entre los ítems; donde la mayor correlación se encontró que la herramienta Kahoot permite aprender mejor los contenidos de un tema de una manera más dinámica y al mismo tiempo esta herramienta motiva a los estudiantes para aprender más sobre el tema. Al mismo tiempo, se puede observar que la menor correlación se da entre la herramienta tecnológica Kahoot implica agilidad y concentración por parte de los estudiantes, pero están de acuerdo que su experiencia de aprendizaje fue alta.

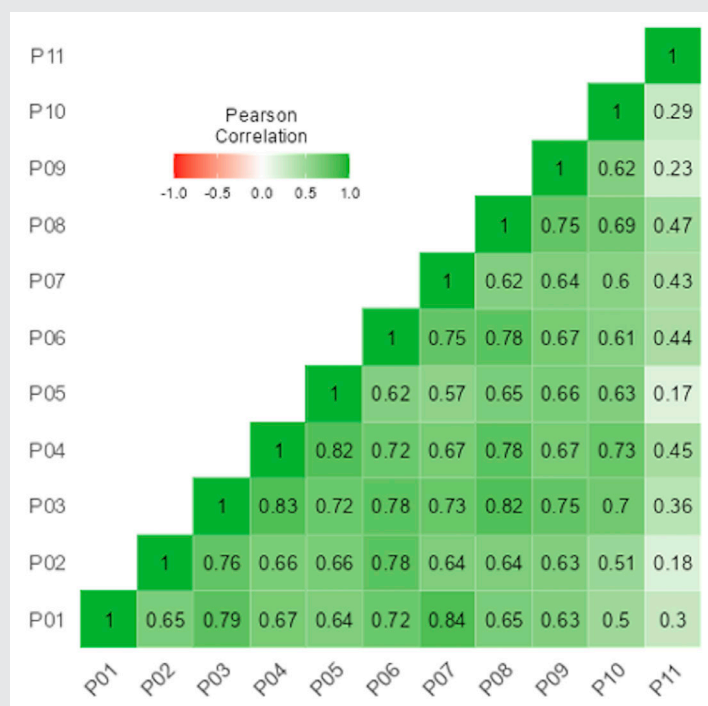


Figura 1. Marca de calor de correlación.

Fuente: Elaboración propia.

El primer objetivo específico de la presente investigación se refería a evaluar el impacto del aula invertida, para lo cual se determinó el rendimiento académico del estudiante a través de la calificación obtenida en el examen (pretest-posttest) de la asignatura "Cálculo Diferencial e Integral", cómo se puede apreciar en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje y desempeño académico por rango.

Examen	Porcentaje de la escala de evaluación					ME	SD
	[0-59]	[60-69]	[70-79]	[80-89]	[90-100]		
Pretest	60%	12%	12%	4%	12%	54.84	25.93
Posttest	36%	4%	12%	4%	44%	68.00	28.14

Fuente: Elaboración propia.

En los resultados que se muestran en la Tabla 6, se puede apreciar que el rendimiento global de los estudiantes en el examen inicial fue de 54.84 y en el caso de la prueba final, el promedio del grupo fue de 68.00. Por tanto, el aumento en el promedio del posttest se debe a la aplicación de la metodología del aula invertida y al uso de la plataforma Kahoot. Asimismo, se observa que el 60% de los estudiantes se ubicó en un nivel insuficiente en el examen (pretest), 24% en un nivel de satisfactorio a bueno y el 16% en un nivel de muy bueno a excelente. Sin embargo, en los resultados obtenidos en el examen (posttest) se observa que el 36% se encuentra en el nivel insuficiente, mientras que el 16% se encuentra en nivel de desempeño satisfactorio a bueno, y el 48% lograron un nivel de rendimiento de bueno a excelente como se puede apreciar en la Figura 2.

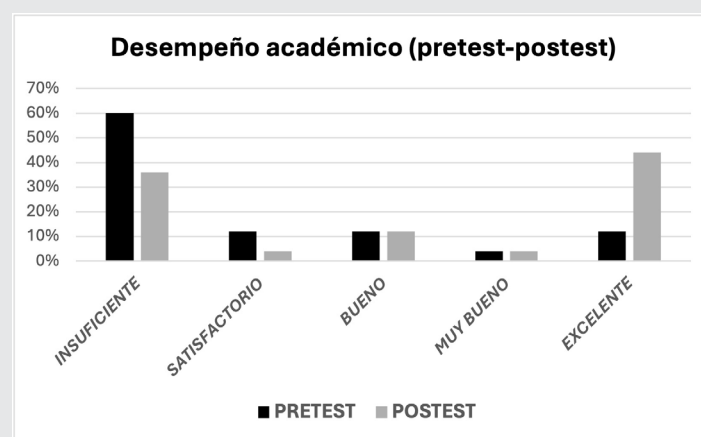


Figura 2. Gráfica desempeño académico de los estudiantes (pretest-posttest).

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2, se puede observar que hay una mejora de los estudiantes en su desempeño luego de haber implementado la metodología del aula invertida, lo que denota la importancia de seguir usando este tipo de estrategias para contribuir a la motivación, participación activa y mejora del desempeño académico de los estudiantes.

Enseguida, el segundo objetivo específico de esta investigación se refería a evaluar la efectividad del kahoot. Los resultados de la guía de observación por dimensiones de los alumnos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos de la guía de observación.

Dimensiones	N	ME	EM	DT	Mín	Máx
Participación (PA)	25	2.40	0.16	0.82	1	3
Involucramiento (IN)	25	2.40	0.16	0.82	1	3
Trabajo en equipo (TE)	25	2.40	0.16	0.82	1	3
Compromiso (CO)	25	2.40	0.16	0.82	1	3
Desempeño (DS)	25	2.25	0.14	0.72	1	3

N= muestra, M= media, EM= error de la media, DT= desviación estándar, Min= mínimo, Max=máximo.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7, se observa que los estudiantes de la carrera INCE del CUCEI muestra que las dimensiones mayormente desarrolladas son la PA, IN, TE, CO, con una media de 2.40 (DT=0.82) que las ubica en una muy buena posición; mientras que la menos desarrollada por los estudiantes universitarios fue el desempeño académico (DS) con una media de 2.25 (DT=0.72).

Finalmente en la Tabla 8, se presenta un resumen de los 11 ítems, donde se muestra la percepción de los estudiantes que contestaron la encuesta al finalizar el curso y que hace referencia al tercer objetivo específico de la presente investigación.

Tabla 8. Ítems de cuestionario de valoración.

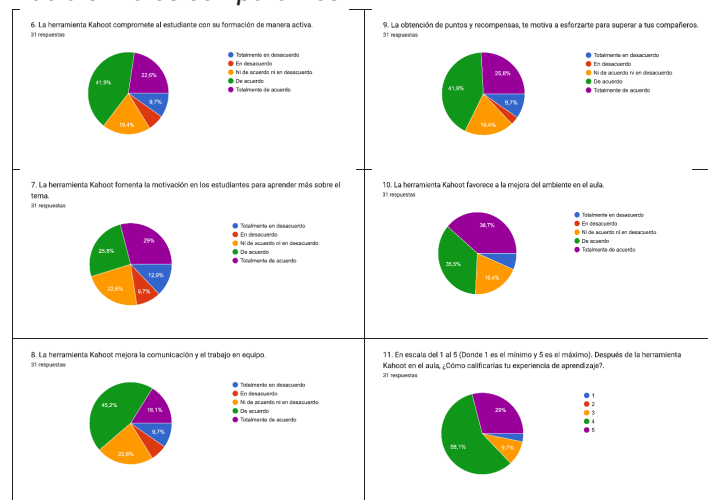
Ítems	Porcentajes de escala Likert					Media	Desviación Estándar
	5	4	3	2	1		
P01	48.39	32.26	6.45	0.00	12.90	4.0	1.3
P02	48.39	25.81	6.45	6.45	12.90	3.9	1.4
P03	38.71	41.94	6.45	3.23	9.68	3.9	1.2
P04	51.61	29.03	6.45	0.00	12.90	4.0	1.3
P05	38.71	45.16	3.23	3.23	9.68	3.9	1.2
P06	22.58	41.94	19.35	6.45	9.68	3.6	1.2
P07	29.03	25.81	22.58	9.68	12.90	3.4	1.3
P08	16.13	45.16	22.58	9.68	12.90	3.5	1.1
P09	25.81	41.94	19.35	3.23	9.68	3.6	1.2
P10	38.71	35.48	19.35	0.00	6.45	4.0	1.0
P11	29.03	58.06	9.68	0.00	3.23	4.09	0.83

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 8, en los primeros 4 ítems a los estudiantes que les es indiferente trabajar con la herramienta Kahoot corresponde a un 6.45%, para estos mismos estudiantes, en los ítems

7 y 8 donde se les pregunta con respecto a usar Kahoot para fomentar la motivación para aprender más sobre el tema así como mejorar la comunicación y el trabajo en equipo es un 22.5%, mientras que en los ítems 6, 9 y 10 donde se les pregunta sobre el uso de Kahoot para comprometerse con su formación de manera activa, la motivación a esforzarse para superar a sus compañeros, así como el uso de Kahoot para favorecer la mejora del ambiente en el aula es un 19.35%. Sin embargo, en el ítem 11 donde se pregunta, después de la herramienta Kahoot en el aula, ¿Cómo calificarías tu experiencia de aprendizaje? observamos que un 58.06% menciona que su experiencia de aprendizaje fue alta, un 29.03% menciona que fue muy alta y sólo un 3.22% menciona que fue baja. La información anterior se puede ver gráficamente en la Tabla 9.

Tabla 9. Datos comparativos.



Fuente: Elaboración propia.

Por último en los ítems correspondientes del 12 al 14 donde se les pregunta ya sin escala ¿Qué es lo que más te ha gustado de la herramienta Kahoot?, ¿Qué es lo que menos te ha gustado de la herramienta Kahoot? y en tu opinión ¿Tienes alguna sugerencia que permita mejorar la herramienta Kahoot en el aula?, con respecto a lo que más les gusta a la mayoría de los estudiantes es que la clase es dinámica, otros mencionan que es diferente y divertida, con respecto a lo que menos les gusta la mayoría menciona problemas para conectarse debido al internet y en las sugerencias, la mayoría contestó ninguna.

Los resultados indican que los estudiantes experimentaron un alto nivel de satisfacción con el uso de Kahoot, lo que se tradujo en un aprendizaje más dinámico y colaborativo. Esta satisfacción está alineada con las teorías del aprendizaje activo, que enfatizan la importancia de la participación del estudiante en su proceso educativo. La herramienta Kahoot no solo facilitó la revisión de conceptos, sino que también promovió un ambiente motivador, don-

de los estudiantes se sintieron más involucrados en su aprendizaje.

Al comparar los resultados del pretest y posttest, se observó un incremento notable en el rendimiento académico: el promedio pasó de 54.84 a 68.00. Este aumento sugiere que la metodología del aula invertida, combinada con Kahoot, no solo mejoró la motivación y el compromiso, sino que también impactó positivamente en la comprensión y aplicación de los contenidos matemáticos. La correlación positiva entre la percepción de utilidad de Kahoot y el rendimiento académico refuerza la idea de que herramientas interactivas pueden ser efectivas para abordar las dificultades en materias complejas como el cálculo.

El estudio se fundamenta en teorías educativas contemporáneas que abogan por metodologías activas y centradas en el estudiante. La combinación del aula invertida con Kahoot se alinea con el Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA), que busca atender a las diversas necesidades de los estudiantes mediante enfoques flexibles y accesibles. Además, la gamificación a través de Kahoot facilita un aprendizaje significativo al conectar teoría y práctica, permitiendo a los estudiantes aplicar lo aprendido en un contexto real.

Los hallazgos muestran que no solo se logró una mejora cuantitativa en los resultados académicos, sino también cualitativa en términos de satisfacción estudiantil. Esto sugiere que las metodologías innovadoras pueden ser cruciales para transformar la experiencia educativa, especialmente para estudiantes que provienen de contextos académicos menos preparados para enfrentar desafíos matemáticos avanzados.

CONCLUSIONES

El análisis cuantitativo revela que el cuestionario utilizado mostró una alta confiabilidad, con un alfa de Cronbach de 0.9495, indicando que los ítems medían de manera consistente las percepciones estudiantiles sobre el aprendizaje y la metodología empleada. La correlación de Pearson mostró que la herramienta Kahoot está fuertemente relacionada con el aprendizaje dinámico y la motivación, lo que sugiere que su uso puede facilitar una mejor comprensión de los contenidos. Específicamente, se observó que el rendimiento académico de los estudiantes mejoró significativamente, pasando de un promedio de 54.84% en el pre-test a 68.00% en el pos-test, lo que indica un avance notable en su comprensión de la materia. Además, se evidenció un cambio en la distribución del rendimiento: mientras que en el pre-test el 60% de los estudiantes se ubicaba en un nivel insuficiente, en el posttest esta cifra se redujo al 36%, con un aumento considerable en los niveles de desempeño bueno a excelente.

A pesar de estos resultados positivos, el estudio presenta algunas limitaciones. El tamaño de la muestra fue reducido (25 estudiantes), lo que puede limitar la generalización de los hallazgos a otros contextos educativos. Además, existe la posibilidad de sesgos en las respuestas debido a la naturaleza subjetiva del cuestionario y a factores externos que pueden haber influido en las percepciones de los estudiantes. Los datos cualitativos también señalaron problemas de conectividad durante las sesiones, lo que podría haber afectado la participación y el rendimiento en algunas instancias.

Para replicar o escalar esta estrategia en otros contextos educativos, se recomienda considerar los siguientes aspectos:

- Incluir un mayor número de participantes para obtener resultados más representativos y generalizables.
- Capacitar a los docentes en el uso efectivo de herramientas tecnológicas como Kahoot y en metodologías activas para maximizar su impacto.
- Asegurarse de contar con una infraestructura tecnológica adecuada para evitar problemas de conectividad durante las sesiones.
- Personalizar las actividades basadas en las necesidades específicas del grupo y los contenidos del curso.

Este enfoque pedagógico es particularmente beneficioso para la enseñanza del Cálculo Diferencial e Integral, una disciplina conocida por su complejidad. La metodología del aula invertida permite a los estudiantes familiarizarse con los conceptos teóricos antes de las clases presenciales, facilitando así un tiempo más productivo para la resolución de problemas y la aplicación práctica durante las sesiones. La gamificación mediante Kahoot no solo aumenta la motivación, sino que también promueve un aprendizaje colaborativo, donde los estudiantes pueden discutir y resolver dudas entre ellos, enriqueciendo así su comprensión conceptual.

Por último, la combinación del aula invertida con Kahoot ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar tanto la satisfacción como el rendimiento académico en Cálculo Diferencial e Integral, sugiriendo que este enfoque puede ser clave para abordar las dificultades inherentes a esta materia compleja.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Martínez Navarro, G. (2017). Tecnologías y nuevas tendencias en educación: Aprender jugando. El caso de Kahoot. Opción: Revista de Ciencias Humanas y Sociales, 83, 252-277.*
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6228338>.

[2] Rojas-Viteri, J., Álvarez-Zurita, A., & Bracero-Huertas, D. (2021). Uso de Kahoot como elemento motivador en el proceso enseñanza-aprendizaje. *Cátedra*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.29166/catedra.v4i1.2815>.

[3] Venegas Villanueva, E. (2018). Las distintas aristas de la innovación educativa. *Transatlántica de educación*, ISSN 1870-6428, No. 20-21, 2018 (Ejemplar dedicado a: Educación para innovar; innovación para educar), págs. 35-46, 20-21. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6784155>.

[4] Franco, B. M. G., Alcántar, M. del R. C., & Torres, C. I. (2021). Experiencia de aprendizaje móvil con apoyo en el Flipped Classroom en estudiantes universitarios. *EDUCATECONCIENCIA*, 29 (Esp.), Article Esp. <https://doi.org/10.58299/edu.v29iEsp.392>.

[5] García, E. B. B., Pacheco, K. B. Q., & Pacheco, E. I. R. (2020). Aula invertida en tiempos emergentes covid-19. *Revista Científica Retos de la Ciencia*, 4(9), 24-36. <https://www.retosdelacienciaec.com/Revistas/index.php/retos/article/view/321/167>.

[6] Estadísticas de puntajes mínimos UdeG. <http://www.escolar.udg.mx/estadisticas/seccion/47/2024>.

[7] Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Vol. 6). México: McGraw-Hill. <https://pdfs.semanticscholar.org/f6bf/7901dcceae8e87c5760eb13ff6ef5ff3f072.pdf>.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Evaluación del dominio del método directo y cambio de variable en cálculo integral: Un estudio de caso en estudiantes de Ingeniería en Gestión Empresarial



Colaboración

Elda Jacinto Martínez; Yesenia González Cruz; Beatriz Cupido Pimentel, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Las Choapas

Fecha de recepción: 17 de agosto de 2024

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2024

RESUMEN: La presente investigación tiene como propósito evaluar el dominio del método directo y cambio de variable en cálculo integral en los estudiantes de ingeniería en Gestión empresarial en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de las Choapas, durante el periodo Febrero – Junio 2024, es una investigación que posee un alcance documental, descriptivo, explicativo, correlacional y un corte longitudinal, se considera un grupo control y uno experimental, para determinar la muestra se utiliza un muestreo aleatorio simple por estratos, se considera una población de 54 estudiantes.

Y para dar validez a los resultados obtenidos se realiza la prueba paramétrica probabilística con t-student para muestras pequeñas dando como resultado un p-valor menor del nivel de significancia del 5%, se rechaza la hipótesis nula (H_0), existiendo suficiente evidencia que existe diferencia en ambos grupos en el dominio del método directo y cambio de variable en la evaluación del cálculo integral en los estudiantes de ingeniería en Gestión Empresarial del TecNM / ITSCH.

PALABRAS CLAVE: dominio, método directo, cambio de variable, cálculo integral.

ABSTRACT: The purpose of this research is to evaluate the mastery of the direct method and change of variable in integral calculus in engineering students in Business Management at the Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de las Choapas, during the period February - June 2024, it is a research that has a documentary, descriptive, explanatory, correlational scope and a longitudinal section, a control group and an experimental group are considered, to determine the sample a simple random sampling by strata is used, a population of 54 students is considered.

And to validate the results obtained, the probabilistic parametric test is carried out with t-student for small samples, resulting in a p-value lower than the 5% significance level, the null hypothesis (H_0) is rejected, there is sufficient evidence that There is a difference in both groups in the mastery of the direct method and change of variable in the evaluation of integral calculus in engineering students in Business Management of TecNM / ITSCH.

KEYWORDS: domain, direct method, change of variable, integral calculus.

INTRODUCCIÓN

Hoy día ha cambiado la forma de evaluar a los estudiantes debido a que se trabaja con enfoque por competencias y los docentes deben utilizar estrategias que le apoyen al estudiante a adquirir el conocimiento, y dentro de su proceso de aprendizaje este pueda manifestar el aprendizaje mismo logrado, “desarrollando mecanismos que van de la práctica a la teoría y de ésta nuevamente a la práctica” [1, p.39], formando un estudiante que “desarrolla una capacidad metacognitiva es decir, la de pensar sobre su propio

pensamiento capacidad que le permite en sus estadios de evolución, socialización y formación humana y académica ser reflexivo y autocrítico sobre su aprender y lo aprendido [1].

La importancia de las matemáticas dentro del Instituto tecnológico superior de las Choapas busca dentro de las áreas de la ingeniería darle la importancia en los estudiantes para que como vayan avanzando en sus semestres obtengan una formación de calidad como futuro profesionista. El aprendizaje de cálculo integral dentro de sus contenidos tiene un enfoque de las técnicas de integración preferentemente en la unidad dos en donde curricularmente contiene distintos métodos que son método directo, cambio de variable, por partes, trigonométricas, sustituciones trigonométricas y fracciones parciales, todas y cada una de ellas son importantes.

Planteamiento del problema

El Tecnológico Nacional de México campus las Choapas los comentarios de los docentes que imparten las materias subsecuentes como: economía empresarial, probabilidad y estadística, Costos empresariales, dentro del aula ellos manifiestan que existe un bajo aprovechamiento de los alumnos de la carrera de ingeniería en gestión empresarial específicamente en la asignatura de cálculo integral que se imparte en el segundo semestre, carecen del dominio del método directo y cambio de variable es el que más se utiliza dentro de las materias ya mencionadas, en las evaluaciones diagnósticas se aprecia un aprendizaje de carencia previas las cuales fueron abordadas durante el segundo semestre cursado por los alumnos y son necesarias las técnicas de integración para continuar en la modelación matemática de fenómenos de su contexto en el sistema escolarizado y sistema mixto.

Los docentes manifiestan que a los alumnos se les evalúan con ejercicios prácticos, participaciones en clases, ejercicios extra clase, el uso de los Tic's con ejercicios de forma individual y en equipo, así como reforzamientos de recursos con videos, estos cumplen con los criterios de evaluación durante la unidad, solo que al evaluarlos en el examen escrito es cuando se sienten no motivados debido a que el alumno no le da la prioridad.

De acuerdo a lo anterior mencionado se ha decidido investigar por medio de la evaluación en el dominio del método directo y cambio de variable en cálculo integral en los estudiantes de Ingeniería en Gestión Empresarial mediante una evaluación escrita con dos grupos diferentes para conocer si existe evidencias como lo han manifestado los docentes que imparten las materias subsecuentes que los estudiantes tienen deficiencia en el dominio, y que el docente se forme en mejores procesos de evaluación.

El docente adquiere evidencias de producto, conocimiento, actitudes y desempeño ¿Cuál es el dominio del

estudiante de ingeniería en gestión empresarial en cálculo integral del método directo y cambio de variable? Pregunta que se pretende responder en este objeto de estudio.

En este estudio se evalúa en el alumno el dominio del método directo y cambio de variable en cálculo integral en los estudiantes de ingeniería en gestión empresarial en el TecNm/ Instituto Tecnológico Superior de las Choapas, ya que se le considera fundamental que dentro del proceso de enseñanza aprendizaje posea el dominio de estos, dos métodos como mínimo, que son parte de su evaluación formativa dentro del contenido de la asignatura, es importante destacar que para que el alumno pueda resolver ejercicios que incluyan procedimientos y fórmulas básicas, debe tener la capacidad de comprensión y actitud para encontrar la respuesta correcta.

¿Por qué considerar una evaluación formativa incluyendo estos dos métodos?, bien el modelo educativo del siglo XXI [1], menciona que los contenidos procedimentales el saber hacer “son ejecuciones de procesos, métodos, técnicas, y, desde luego, de procedimientos”. Así como el saber ser “considera que los contenidos actitudinales son parte de la formación del alumno, debido a que “se hacen presentes en la aplicación de los contenidos conceptuales y procedimentales” [1].

El Modelo educativo para el siglo XXI [1], también “considera al aprendizaje como un proceso constructivo que requiere de la voluntad del individuo para conocer, gestionar información usar mecanismos intelectuales y herramientas culturales (lenguaje oral y escrito), exteriorizar y comprometer actitudes e interactuar con otros en el manejo de saberes para la aplicación de conocimientos y la solución de problemas” por lo que se considera que la evaluación escrita no debe quedar excluida de la evaluación formativa, ya que mediante el desempeño puede demostrar el desarrollo de las habilidades que requiere su campo de formación [1].

Involucrando los términos anteceditos en conjunto se confirma por Sandoval [2] que una “evaluación consiste en recolectar información para realizar un juicio que permita tomar decisiones con la finalidad de mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje” [2].

El Manual de Lineamientos Académico-Administrativos TecNM [3], indica que “La forma de evaluación, por su finalidad y el momento en que se aplica, son tres la diagnóstica, formativa y sumativa, e indica que en la evaluación formativa hace referencia a que “durante la formación y desarrollo de competencias se generan evidencias que dan cuenta tanto del proceso mismo, como del nivel de desempeño alcanzado, que permiten una evaluación continua”, en esta etapa se van agregando las estrategias enseñanza-aprendizaje con las que se evalúan a los alumnos, siendo las evidencias de apren-

dizajes participación en clases, participación extra clase, mapas conceptuales, mapas mentales, prácticas, proyectos y evaluación escrita por mencionar algunos, siendo esta última la que evalúa conocimiento y habilidades del alumno, por ello en la investigación se utiliza como el instrumento una evaluación con reactivos para verificar el conocimiento y dominio de ambos métodos [3].

Como menciona Clavijo [4], “sin la evaluación sería imposible saber qué han aprendido los estudiantes en relación con los contenidos y cómo estos saberes se expresan en conocimientos, habilidades, actitudes y valores mediante diversas tareas” [4].

Definitivamente como lo indica el autor mencionado, se necesita una herramienta que permita verificar que el alumno posee los conocimientos y habilidades que se requieren para la resolución de ejercicios en el área de matemáticas, y que mejor instrumento que una evaluación escrita, también se debe considerar que la mayoría de los alumnos en el área de gestión empresarial se les dificulta el dominio del cálculo integral en la ingeniería, más sin embargo es indispensable que desarrolle esta habilidad y es necesario que el docente agote todas sus estrategias de enseñanza para fortalecer el aprendizaje.

Introduciendo un poco en la importancia del tema de cálculo integral, se menciona a García [5], quien realiza una investigación descriptiva sobre la problemática de la enseñanza y el aprendizaje del cálculo para ingeniería en la universidad de Costa Rica, considera que “el aprendizaje y la enseñanza de las matemáticas en general, y del cálculo en particular, presentan una de las mayores dificultades para los estudiantes de nivel universitario, incluidos los estudiantes de las carreras de Ingeniería” [5z]. En muchas otras ocasiones no solo es el desarrollo de la habilidad en el estudiante sino las estrategias que utiliza o implementa el docente, alusivo a esto el autor Rojas [6], considera que “el profesor debe saber, utilizar diversas vías, cuál es el estado real del aprendizaje de sus estudiantes para, sobre esa base, dirigir el proceso hacia la búsqueda de lo nuevo” [6].

También Sánchez et al. [7], en su artículo de Estrategia didáctica para desarrollar la habilidad de calcular integrales definidas desde un aprendizaje creativo, citando a Ferrer Vicente y Rebollar Morote (1995), considera que “una habilidad matemática es la construcción por el alumno del modo de actuar inherente a una determinada actividad matemática, que le permite buscar o utilizar conceptos, propiedades, relaciones, procedimientos matemáticos” [7]. Por lo tanto, el alumno será capaz de aplicar su habilidad y comprensión en la lógica matemática desde que se imparte la integral definida en donde se hacen uso de las propiedades de las integrales, las cuales son apoyo para realizar los procedimientos que se utilizan en los tipos de integración de las integrales

indefinidas abordadas en temas anteriores que ya debió conocer el alumno y que le permitirá continuar con los temas posteriores, donde utiliza el método directo y cambio de variable.

Por todo lo descrito en párrafos anteriores no se puede dejar fuera el tema de integral indefinida, abordado por Larson y Edwards [8], que “indican que esta puede estar de forma simple o compuesta, para el método directo, y para el caso de cambio de variable se utilizan en sustitución una letra que se sustituye se puede reescribir por completo la integral en términos de u y du (o cualquier otra variable conveniente)” [8].

Mientras el autor Escorcia et al. [9], sugiere que para resolverlas los ejercicios donde se utilizan la aplicación de cambio de variable se realicen los siguientes pasos:

- 1.-Escoger la sustitución $u=g(x)$. Se sugiere elegir como la función u la parte interna de una función compuesta del integrando.
- 2.-Hallar “ $du=g'(x) dx$ ”
- 3.-Reescribir la integral en términos de la nueva variable u .
- 4.-Calcular la antiderivada general del (paso tres) en términos de u .
5. Reescribir la antiderivada general (del paso cuatro) en términos de la variable x , reemplazando u por $g(x)$ [9].

Hay que destacar que en las integrales indefinidas en donde utiliza funciones con expresiones algebraicas y polinómicas es necesario conocer y utilizar las propiedades de la integral, como especifica el autor Guadarrama [10].

a) $\int [f(x)+g(x)]dx = \int f(x)dx + \int g(x)dx$ es la propiedad de la suma o resta de dos funciones se puede separar en dos integraciones debido al operador matemático que utiliza.

b) $\int kf(x)dx = k \int f(x)dx$ donde k es un número real [10, p. 71-72]. Esta propiedad ayuda a separar fuera de la integral a la constante k y dejar únicamente a la variable independiente dentro del integrando.

MATERIAL Y MÉTODOS

Metodología

El estudio se realizó durante el semestre febrero-junio 2024 con alumnos de la carrera de ingeniería en gestión empresarial del Tecnológico, y el objetivo es evaluar el dominio del método directo y cambio de variable en cálculo integral en los estudiantes de ingeniería en gestión empresarial en el Tecnológico Nacional de México / Tecnológico, mediante un grupo experimental y un grupo control.

Es una investigación que posee un alcance documental, descriptivo, explicativo, correlacional y un corte longitudinal, se considera un grupo control y uno experimental.

Para el grupo experimental se usa prueba previa sin intervención del docente, y para el grupo control la prueba posterior con intervención del docente y sus estrategias de enseñanza aprendizaje.

Participantes

La población total la formaron 54 alumnos de la carrera de ingeniería empresarial, del cual el sistema escolarizado son 24 estudiantes y sistema mixto 30 todos inscritos en el segundo semestre del periodo febrero-junio 2024 en el Instituto Tecnológico Superior de las Choapas

Para la muestra se consideró al grupo experimental a los alumnos de sistema mixto con previos conocimientos en el método directo y de cambio de variable conocimientos adquiridos en la preparatoria y de cálculo diferencial, mientras que el grupo control lo formaron los del sistema escolarizado con conocimientos adquiridos en el aula guiados por su docente que les impartió la clase de cálculo integral de la unidad dos con técnicas de enseñanza de ejercicios prácticos, ejercicios de participación dentro del aula, ejercicios extra clase y herramientas tecnológicas como Tic's.

Para determinar la muestra se utilizó un muestreo aleatorio simple por estratos utilizando la Ec.(1) [11].

$$n = \frac{Nz^2pq}{(N-1)e^2 + z^2pq} \quad \text{Ec.(1)}$$

Descripción de los parámetros de la fórmula 1:

N = Población

z = Parámetro estadístico que depende el nivel de confianza

p = Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito)

q = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado

e = Error de estimación máximo aceptado.

Al sustituir en la ecuación uno (Ec. 1), el parámetro de N con una población de 54, con un nivel de confianza del 95% la cual le corresponde un valor de Zeta crítica de 1.96 y una probabilidad de que ocurra el evento estudiado en proporción del 50%, así como un error estimado del 5%, con estos datos en la ecuación uno Ec. (1), se obtuvo una muestra de 47 alumnos como se muestra en la Tabla 1, de los cuales 68 % son mujeres y 32 % son hombres.

Tabla 1. Sustitución para determinar el valor de la muestra.

Cálculos del tamaño de la muestra				
N	z	p	q	e
54	1.96	0.5	0.5	0.05
$n = \frac{54(1.96)^2(0.5)(0.5)}{(54-1)(0.05)^2 + (1.96)^2(0.5)(0.5)} = \frac{51.8616}{1.0929} = 47.4531$				

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se muestran los dos grupos a utilizar en el objeto de estudio y se observa que para el grupo experimental (sistema mixto) será de la muestra de 29 y para el grupo control(sistema escolarizado) 18 alumnos del TecNM / Instituto Tecnológico Superior de las Choapas.

Tabla 2. Muestra por estrato.

Carreras	Población	Estratos
Ingeniería en Gestión Empresarial sistema Mixto	33	29
Ingeniería en Gestión Empresarial sistema Escolarizado	21	18
	N=54	n=47

Fuente: Elaboración propia.

La investigación de estudio se dividió en una evaluación previa para el grupo experimental (Sistema mixto) y otra posterior para el grupo control (Escolarizado) ambos se aborda la temática del método directo y cambio de variable, se utilizó el mismo instrumento con los mismos reactivos, este fue un examen escrito con 4 reactivos, dos de opción múltiple y 2 de respuestas abiertas las que fueron analizadas y revisadas por expertos (profesores que imparten la asignatura de cálculo integral). A los participantes se les proporciono un juego las fórmulas de integración básicas a utilizar en esta evaluación y a cada reactivo se le asigno un valor ponderativo de 7.5 puntos, teniendo como valor total la evaluación escrita de 30 puntos, con dicho instrumento se evaluó en el alumno el dominio del método directo y cambio de variable en la asignatura de cálculo integral, ya que es importante que adquiriera el conocimiento y las habilidades en la utilización de estos métodos, así mismo aporta información acerca del desempeño del alumno mediante una evaluación escrita (la cual es parte de las evidencias formativas).

En el instrumento previo y posterior se consideró lo siguiente:

En el reactivo uno se le pide al alumno que resuelva la integral indefinida, en donde el integrando está compuesto por una función algebraicas cuadrática y que se encuentra multiplicada por una constante siendo (1/2) considerando que es un ejercicio simple y puede ser contestado por el alumno realizando los procedimientos y aplicación de una de las propiedades de la integral indefinida en donde involucra una constante que multiplica a la función cuadrática para encontrar su solución final utilizando las fórmulas de integración básica incluidas en el formulario proporcionado a los estudiantes, siendo un ejercicio de (opción abierta).

Para el reactivo dos se le solicita al alumno que realice la integral indefinida, en donde el integrando es una función compuesta, en estos tipos de ejercicios el integrando (lo que se encuentra dentro del símbolo de

la integral) está formado por una función $g(x)$ es decir $(x^3+3)^4$ multiplicada por la derivada de la parte interna de la misma función, por la que se puede utilizar el método directo y el método de cambio de variable, en el reactivo solo se le solicita al alumno que lo resuelva utilizando el método de cambio de variable, en donde tendrá que utilizar una variable que puede identificarla como u es decir $u=g(x)$ para que pueda derivar a u obteniendo " $du=g'(x) dx$ " que es equivalente a la primera derivada de u . Al alumno se le proporcionan 4 opciones de respuesta posibles (opción múltiple), pero para llegar a la correcta, debe realizar el procedimiento; es importante destacar que en este reactivo se evalúa el procedimiento de la resolución del ejercicio realizado por los alumnos que les permitió llegar a la opción seleccionada.

Para el reactivo tres, se requiere que el alumno realice la integral indefinida, por el método directo en donde el integrando está compuesta por una función lineal (r) multiplicada por una constante (π), siendo por ello una función simple; es decir, una expresión algebraica, que se realiza de forma inmediata utilizando las propiedades de la integral indefinidas y posteriormente utilizando las fórmulas de integración básicas, realizando los pasos necesarios para llegar a la solución correcta (opción abierta), en este se califica el procedimiento para llegar al resultado.

En el último reactivo, se le pide al alumno realice la integral indefinida, por el método directo en donde el integrando está compuesto por dos funciones algebraicas que se están sumando, se resolverá de acuerdo a los procedimientos deberá utilizar la propiedad de la suma o resta de dos funciones para poder separar las dos funciones que se encuentran dentro de la integral y obtener dos integrales, continuando con su resolución y con la aplicación de las fórmulas de integración básicas proporcionadas al alumno, es un ejercicio donde se califica el procedimiento realizado para llegar a la solución correcta y que le permite seleccionar el inciso correcto (opción múltiple).

Validación del instrumento

Para darle confiabilidad "consistencia interna se refiere al grado en que los ítems de una escala se correlacionan entre ellos" [12, p.39], con los datos obtenidos se empleó el programa estadístico IBM SPSS Statistics, versión 30 [13], para la comprobación de la asociación entre las variables de estudio, con esto se pretende dar importancia a la validez y confiabilidad del instrumento utilizado durante la investigación, con un rango de respuesta del 1 al 4, donde 1 significa mal, 2 expresa regular, 3 representa bien y 4 denota excelente.

Los resultados de la información analizada se muestran en la Tabla 3, se observa que se obtiene un valor de 0.843 dentro de un rango de 0.5 a 0.90 siendo un rango de bueno [12].

Tabla 3. Cálculo de Alfa de Cronbach en SPSS V.30.

Estadístico de fiabilidad		
Alfa de Cronbach	Alfa de Cronbach basada en elementos estandarizados	N de elementos
0.833	0.834	4

Fuente: Elaboración propia.

Para este estudio se planteó las siguiente como hipótesis:

H_0 = No hay diferencia en ambos grupos en el dominio del método directo y cambio de variable en la evaluación escrita de cálculo integral en los estudiantes de ingeniería Empresarial en Gestión Empresarial.

H_1 = Si existe diferencia en ambos grupos en el dominio del método directo y cambio de variable en la evaluación escrita de cálculo integral en los estudiantes de ingeniería Empresarial en Gestión Empresarial.

RESULTADOS

Mediante la herramienta Excel-Microsoft Office se realiza la organización de la información obtenida del instrumento de evaluación, el cual contiene cuatro reactivos, tres de método directo y una de cambio de variable. La Figura 1, presenta los resultados obtenidos de la evaluación previa de los estudiantes considerados en la muestra.

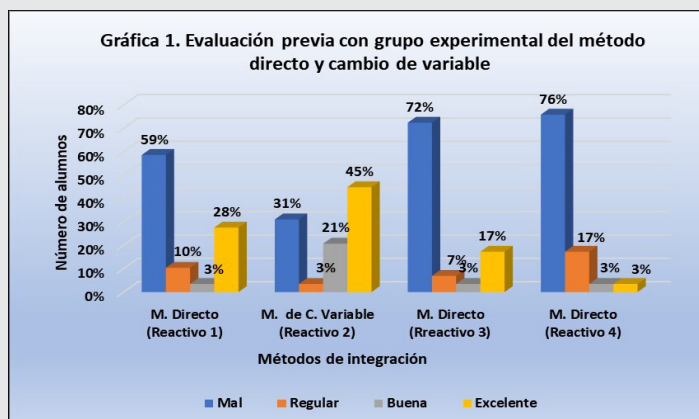


Figura 1. Gráfica 1. Evaluación previa.

Fuente: Propia de los autores.

Interpretación la gráfica 1. Reactivo 1 (Método directo), se le solicitó al alumno que resolviera la integral indefinida en donde el integrando está compuesto por una función algebraica cuadrática y que se encuentra multiplicada por una constante de $(1/2)$, en la respuesta de la evaluación previa se observa que el 59% que corresponde a 17 alumnos no la contestaron, el 10% equivalente a 3 alumnos siendo minoría, con un 3% muy bajo estuvieron en la escala buena, en el caso de escala excelente un 28% arriba de una cuarta parte del total de los alumnos es decir 8 alumnos, confirmando que arriba del 25% dominan el método que se evalúa.

Reactivo 2 (Método de Cambio de variable), se le solicita al alumno que realice la integral indefinida, en donde el integrando es una función compuesta, en la evaluación previa el 31% que corresponde a 9 alumnos que contestaron de forma incorrecta debido a que no la contestaron, mientras una minoría del 3% equivalente a 1 contestaron en el rango de regular, con un 21% que corresponde a 6 alumnos obtuvieron respuestas dentro del rango buena y con un 45% no siendo ni la mitad de los alumnos llegaron al rango de excelente.

Reactivo 3 (Método directo), se solicita al alumno realice la integral indefinida, por el método directo en donde el integrando está compuesta por una función lineal (r) en vez de x , multiplicada por una constante (π), se observa que en la evaluación previa el 72% equivalente a 21 alumnos contestaron en la escala de mal es decir no la contestaron de forma correcta, mientras que un 7% equivalente a 2 de los alumnos contestaron en la escala de regular de los que si dominan el método, mientras que un 3% equivalente a 1 alumno se encuentran en la escala de buena y un 17% en el rango de excelente no existiendo minoría en el dominio en el aprendizaje del método de integración.

Reactivo 4 (Método directo), se le indica al alumno resuelva la integral indefinida en donde el integrando está compuesto por dos funciones algebraicas que se están sumando, en la evaluación previa el 76% equivalente 22 de los alumnos contestaron mal en todos los aspectos o no la contestaron, con solo una minoría del 17% equivale 5 alumnos contestaron de forma regular, y solo el 3% se encuentra entre buena y excelente, aquí se observa que el alumno presenta más dominio que en el reactivo 1, ciertamente aunque son mismo método solo cambian el tipo de función y en este reactivo que usa el método directo es en donde más alumnos existen de reprobados.

A continuación, se presenta en la Figura 2 la evaluación posterior cuando ya se les dio intervención a los alumnos, técnicas didácticas para su evaluación.

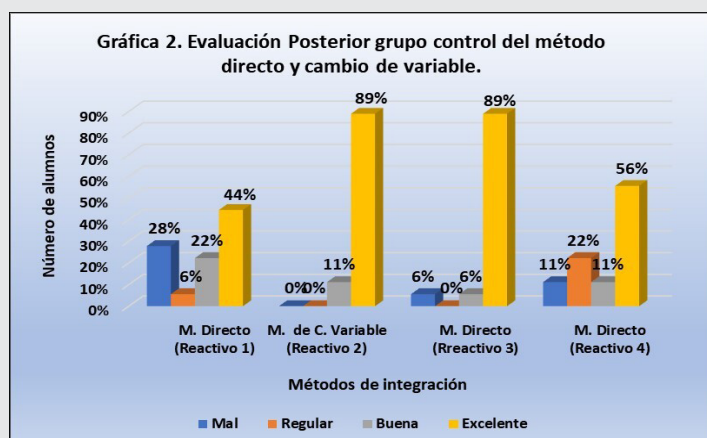


Figura 2. Gráfica 2. Evaluación posterior.

Fuente: Propia de los autores.

Interpretación gráfica 2. Reactivo 1 (Método directo), se le solicita al alumno que resolviera la integral indefinida en donde el integrando está compuesto por una función algebraica cuadrática y que se encuentra multiplicada por una constante de $(1/2)$, en la respuesta de la evaluación posterior se observa que el 28% que corresponde a 5 alumnos no la contestaron y estaban mal, el 6% equivalente a 1 alumno siendo minoría se encontró en el rango de regular, con un 22% (4 alumnos) estuvieron en la escala buena, en el caso de escala excelente un 44% arriba de una cuarta parte del total de los alumnos es decir 8 alumnos casi un 50%.

Reactivo 2 (Método de Cambio de variable), se le solicita al alumno que realice la integral indefinida, en donde el integrando es una función compuesta, Se puede observar que el 0% en la escala de mal y regular, mientras que el 11% que corresponde a 2 alumnos que contestaron el examen escrito contestaron en el rango de buena favoreciendo de esta manera al rango excelente que obtuvo el 89% que corresponden a 16 alumnos llegando al rango de excelente, comprobándose un dominio en este método.

Reactivo 3 (Método directo), se solicita al alumno realice la integral indefinida, por el método directo en donde el integrando está compuesta por una función lineal (r) en vez de x multiplicada por una constante (π), se observa que en la evaluación el 6% equivalente a 1 alumno contestaron en la escala de mal es decir no la contestaron o contestaron de forma incorrecta, mientras que un 6% equivalente a 1 de los alumnos contestó en la escala de buena de los que si dominan el método, mientras que un 89% equivalente a 16 alumnos se encuentran en la escala de excelente existiendo mayoría en el dominio en el aprendizaje del método de integración en este reactivo.

Reactivo 4 (Método directo), se le indica al alumno resuelva la integral indefinida en donde el integrando está compuesto por dos funciones algebraicas que se están sumando, en la evaluación se observa variación ya que el 11% equivalente a 2 alumnos contestaron mal o no lo contestaron, mientras que el 22% lo contestaron forma regular, y solo el 11% se encuentra en escala buena, con el 56% que equivale a 10 alumnos alcanzaron mejoría en excelente ligeramente arriba del 50% en el que se confirma que los alumnos en este método mejora durante la intervención de las didácticas utilizadas por el docente.

Validación de los resultados mediante una prueba paramétrica

Mediante un análisis con uso de la estadística inferencial se realiza la prueba paramétrica para validar los resultados obtenidos en la estadística descriptiva para ambos grupos como se observa en la Tabla 4 donde se realizó el cálculo de las medias.

Tabla 4. Datos de la estadística inferencial.

Grupo	Media	Desviación	Muestra
Experimental	1.95	1.26521654	29
Control	3.40277778	0.87052104	18

Fuente: Elaboración propia.

En este estudio se planteó como hipótesis:

H_0 = No hay diferencia en ambos grupos en el dominio del método directo y cambio de variable en la evaluación escrita de cálculo integral en los estudiantes de ingeniería Empresarial en Gestión Empresarial.

H_1 = Existe diferencia en ambos grupos en el dominio del método directo y cambio de variable en la evaluación escrita de cálculo integral en los estudiantes de ingeniería Empresarial en Gestión Empresarial.

Se considera un nivel de significancia del 5% (0.05), utilizando Microsoft Excel nos generó un valor estadístico de prueba para t de -4.09 con 45 grados de libertad, un valor crítico de 2.014 y comprobándose en obtener el valor de prueba de dos colas un p-valor de prueba de 0.0002, como $p < .05$ se rechaza la hipótesis nula.

La prueba paramétrica de t-student se comprueba que efectivamente si existe diferencia en ambos grupos en el dominio del método directo y cambio de variable en la evaluación escrita, debido a que el grupo experimental no fue guiado por el docente y el grupo control si lo tuvo, y que el grupo control tiene mayor dominio que el grupo experimental.

Trabajo a futuro

En base a lo obtenido en esta investigación, se sugiere implementar métodos pedagógicos alternativas como lo son las herramientas digitales, actividades colaborativas y medir su impacto en futuras cohortes de estudiantes.

Finalmente, hay que considerar que haciendo uso de las estrategias de enseñanza y que estén fundamentadas en las clases de cálculo integral de parte del docente, existe la posibilidad que los alumnos adquieran un aprendizaje cognitivo satisfactorio para alcanzar un aprendizaje significativo que le permitan una preparación en los dos métodos de integración método directo y cambio de variable para proyectarse a las demás materias de aplicación como son; la economía, álgebra lineal, contabilidad etc., esto se puede comprobar al finalizar el semestre aplicando una encuesta a los alumnos para evaluar la percepción que tienen acerca de las estrategias utilizadas e implementadas por el docente, esto permitirá generar un resultado objetivo comparándolo con el porcentaje obtenido por los alumnos en la unidad 2 e incluso en toda la asignatura, dando así certeza si están funcionando o no las estrategias implementadas o hay que realizar alguna modificación, como lo indica Rojas [6], "el profesor debe saber, utilizar di-

versas vías, cuál es el estado real del aprendizaje de sus estudiantes para, sobre esa base, dirigir el proceso hacia la búsqueda de lo nuevo" [6].

Por lo que se considera que es importante que el alumno evalúe las estrategias que está utilizando el docente en el aula, y lograr determinar si se están implementando las ideales para transmitir y desarrollar las habilidades de solución del método directo y cambio de variable en el estudiante, ya que es de suma importancia los alumnos desarrollen esta habilidad.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado que a nivel ingeniería los alumnos deben incorporar los conocimientos previos con los nuevos para que su nivel de comprensión sea más fortalecido, en cada semestre que vaya cursando y que al finalizar la carrera tenga una competencia integral. La materia de cálculo integral es de mucha importancia en la carrera de ingeniería en gestión empresarial debido a que utiliza el pensamiento lógico para el aprendizaje.

En los resultados obtenidos en esta investigación indica que cuando los alumnos fueron evaluados sin la guía del docente en la evaluación previa, mostraron que si tenían nociones básicas de cálculo integral en cuanto a los dos métodos de integración (método directo y cambio de variable), pero no lo suficiente como para obtener más del 80% de reactivos correctos; es decir, el dominio de los métodos.

En la solución del método de cambio de variable, en la evaluación previa el 45% que correspondieron a 13 alumnos que contestaron de forma excelente fue minoría, mientras que el 89% equivalente a 16 alumnos contestaron de forma excelente en la evaluación posterior, con esto se comprueba que efectivamente en el previo no tuvo la intervención educativa por parte del docente no conocían como llegar a la solución, en la evaluación posterior si fue conducido por el docente.

Definitivamente se observa que en los ejercicios en donde aplican el método directo con solo variar el tipo de función dentro del integrando el alumno muestra dificultades al resolverlo con los procedimientos, como se mostró en el reactivo tres (método directo) de la evaluación previa, que en la función del ejercicio solo se cambió la variable independiente x por una r, y se obtuvo el 17% que corresponden a 5 alumnos que obtuvieron respuestas excelentes y correctas 3% en el reactivo 4 siendo el mismo método de integración, cuando en realidad se considera un ejercicio sencillo y simple, ya que la sustitución de una variable por otra no afecta la resolución.

Concluyendo que los alumnos mejoraron en el dominio de ambos métodos, y esto se puede verificar en la evaluación posterior, debido a que los porcentajes obtenidos fueron más altos comparados con la evalua-

ción previa por lo que la hipótesis alternativa planteada “Existe diferencia en ambos grupos en el dominio del método directo y cambio de variable en la evaluación escrita de cálculo integral en los estudiantes de Ingeniería en Gestión Empresarial”, la cual se confirma con los resultados obtenidos por los estudiantes en la evaluación posterior, si dominan el método directo y cambio de variable, debido a la intervención, sin embargo no afirma que al 100% lo dominen, incluyendo que tenían el guía del docente donde estableció estrategias didácticas en su aprendizaje, ejercicios de práctica, ejercicios de participación dentro de aula, ejercicios extra clase, videos como recurso. Por lo que se recomienda realizar ejercicios adicionales o actividades enfocadas en el método que presenten mayores dificultades, así como un valor agregado de aplicarlos a ejemplos de campo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los estudiantes que apoyaron con su evaluación de forma objetiva, ya que fue parte de la evaluación real en la unidad dos de la materia de cálculo integral, también se agradece a los docentes de la academia de ciencias básicas y de la carrera de Ingeniería en Gestión Empresarial por las facilidades y el apoyo brindado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] **MODELO EDUCATIVO PARA EL SIGLO XXI. “Formación y Desarrollo de Competencias Profesionales”.** Dirección General de Educación Superior Tecnológica, Diciembre. 2012. [En línea]. Disponible: <http://www.dgest.gob.mx/modeloeducativo/modeloeducativo.pdf>.

[2] P. Sandoval Rubilar, A. C. Maldonado-Fuentes, y M. Tapia-Ladino, “Evaluación educativa de los aprendizajes: Conceptualizaciones básicas de un lenguaje profesional para su comprensión”, PE, vol. 15, no. 1, pp. 49-75, Junio. 2022. <https://revistas.ucu.edu.uy/index.php/paginasdeeducacion/article/view/2638/2546>.

[3] **Manual de Lineamientos Académico-Administrativos del Tecnológico Nacional de México. “Planes de estudio para la formación y desarrollo de competencias profesionales”.** Tecnológico Nacional de México. 2015. [En línea]. Disponible: https://www.tecnm.mx/normateca/Direcci%C3%B3n%20de%20Docencia%20e%20Innovaci%C3%B3n%20Educativa/Manual%20Lineamientos%20TecNM%202015/Manual_de_Lineamientos_TecNM.pdf.

[4] G. Á. Clavijo Clavijo, “La evaluación del y para el aprendizaje”, Observatorio/Instituto Para El Futuro De La Educación, Febrero. 2021. https://drive.google.com/file/d/19-QCWSJC_aizMeW0SUK2f-JYXgBwExzZO/view?usp=sharing&usp=embed_

[facebook%20\(accessed%20Jul.%2027,%202024\).](facebook%20(accessed%20Jul.%2027,%202024).) (accedido Julio. 24, 2024).

[5] J. Á. García Retana, “La problemática de la enseñanza y el aprendizaje del cálculo para ingeniería,” *Rev Educ*, vol. 37, no. 1, pp. 29-42, Junio. 2013. <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/educacion/article/view/10627>.

[6] A. Rojas Taño y J. B. Rodríguez Sosa, “La significatividad del aprendizaje del cálculo diferencial e integral,” *Varona. Revista Científico Metodológica [en línea]*, vol. 1, no.72, pp. 11-15, Junio. 2021. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1992-82382021000100011&Ing=es&nrm=iso&tlng=es.

[7] W. Sánchez Campanioni, A. Pérez González, y J. M. Remedios González, “Estrategia didáctica para desarrollar la habilidad calcular integrales definidas desde un aprendizaje creativo,” *Mendive Rev. Educ.*, vol. 21, no. 1, pp. 1-17, 4 de Marzo, 2023. <https://mendive.upr.edu.cu/index.php/MendiveUPR/article/view/3007/pdf>.

[8] R. Larson y B. Edwards, *Cálculo I: De una variable*, 9a Ed. México D.F, McGraw Hill, 2010.

[9] E. Escorcía Caballero, E. Hernández Sas-toque, y J. Barros Troncoso, “Cálculo integral aplicado a las ciencias empresariales y económicas,” *Noviembre*. 30, 2020. https://www.google.com.mx/books/edition/C%C3%A1lculo_integral_aplicado_a_las_ciencia/8kYgEAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=0 (accedido Julio. 27, 2024).

[10] M. Guadarrama Gallardo, “Cálculo Integral: Bachillerato Tecnológico,” 2022. https://www.google.com.mx/books/edition/C%C3%A1lculo_integral/z8KVEAAQBAJ?hl=es-%20419&gbpv=0 (accedido Agosto. 11, 2024).

[11] A. Díaz Mata, *Estadística Aplicada a la administración y la economía*, 1a ed. México D.F, McGraw Hill, 2013.

[12] D. Frías Navarro (2022). “Apuntes de estimación de la fiabilidad de consistencia interna de los ítems de un instrumento de medida”. Universidad de Valencia. España. <https://www.uv.es/friasnav/AlfaCronbach.pdf>

[13] IBM SPSS Statistics. *Statistical Package for the Social Sciences (V.30)*. (2024) <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>



Bioquímica *y* Biológicos

Ingeniantes

Efecto fitotóxico de detergente y bismuto sobre la germinación y crecimiento inicial de *Melotria scabra* (sandía de ratón)

RESUMEN: El bismuto se ha considerado durante mucho tiempo un metal de baja toxicidad; sin embargo, los estudios sobre la fitotoxicidad han sido limitados en comparación con otros metales pesados, al igual que sus interacciones con otros contaminantes. Este estudio evaluó los efectos de la contaminación por bismuto y detergente en su presentación líquida y en polvo sobre la germinación y crecimiento inicial de semillas de sandía de ratón (*Melotria scabra*), aplicando un diseño factorial con seis niveles para detergente y dos para bismuto (0 y 20 mg/L). El detergente líquido demostró ser un inhibidor de la germinación de semillas de *M. scabra*, mostrando una clara relación dosis-respuesta. La adición de bismuto, tanto de forma individual como en combinación con el detergente líquido, no modificó significativamente este efecto inhibitorio.

El detergente en polvo también inhibió la germinación y al combinarse con bismuto se observó un efecto sinérgico, potenciando su efecto inhibitorio. Además, con respecto al desarrollo de las plántulas, ambos detergentes afectaron negativamente su crecimiento, reduciendo su longitud, peso y desarrollo radicular. La inclusión de bismuto en los tratamientos no alteró significativamente este patrón, sugiriendo una ausencia de interacciones significativas entre ambos compuestos. Los hallazgos de este estudio apoyan el papel de baja toxicidad de el bismuto en esta especie vegetal de forma individual o combinada con otros contaminantes.

PALABRAS CLAVE: bismuto, detergente en polvo, detergente líquido, germinación, inhibición, *Melotria scabra*.



Colaboración

Arturo Cabrera Vázquez, Escuela de Bachilleres
Artículo Tercero, José Guillermo Franzua Perdomo, Arturo Cabrera Hernández, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 18 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2024

ABSTRACT: Bismuth has long been considered a low-toxicity metal, however studies on phytotoxicity have been limited compared to other heavy metals as well as its interactions with other contaminants. This study evaluated the effects of contamination by bismuth and detergent in its liquid and powder presentation on the germination and initial growth of mouse watermelon (*Melotria scabra*) seeds applying a factorial design with six levels for detergent and two for bismuth (0 and 20 mg/L). The liquid detergent proved to be an inhibitor of *M. scabra* seed germination, showing a clear dose-response relationship. The addition of bismuth, both individually and in combination with the detergent, did not significantly modify this inhibitory effect.

The powdered detergent also inhibited germination and when combined with bismuth, a synergistic effect was observed, enhancing its inhibitory effect. Furthermore, both detergents individually negatively affected the growth of the seedlings, reducing their length, weight and root development. The inclusion of bismuth in the treatments did not significantly alter this pattern, suggesting an absence of significant interactions between both compounds. The findings of this study support the role of low toxicity for bismuth in this species individually or in combination with other contaminants.

KEYWORDS: bismuth, powder detergent, liquid detergent, germination, inhibition, *Melotria scabra*.

INTRODUCCIÓN

Las actividades antropogénicas han inducido cambios significativos en los flujos biogeoquímicos naturales, acelerando la tasa de transferencia y acumulación de contaminantes en los ecosistemas. Estos desequilibrios comprometen la integridad de los recursos hídricos y edáficos a nivel mundial, con implicaciones directas para la salud humana y ambiental [1].

La gestión inadecuada de residuos industriales y domésticos favorecen la dispersión, mezcla, recombinación y acumulación de una amplia gama de contaminantes asociados a actividades de minería, procesamiento de minerales, agricultura, construcción y producción de energía [2].

La contaminación por metales pesados y detergentes ejemplifica la compleja interacción entre actividades humanas y el medio ambiente. Los metales pesados, debido a su persistencia en el medio ambiente y su capacidad de bioacumularse y biomagnificarse, representan un riesgo significativo en la cadena alimentaria y los ecosistemas acuáticos y terrestres [3]. Los detergentes son productos de uso cotidiano con una composición química diversa y compleja que incluyen surfactantes y aditivos como blanqueadores, enzimas, perfumes y agentes constructores, los cuales contribuyen a la contaminación ambiental y a la degradación de los recursos hídricos [4]. Al ser descargados en cuerpos de agua sin el tratamiento adecuado, alteran los delicados equilibrios de los ecosistemas acuáticos y terrestres; en estos últimos generan efectos fitotóxicos negativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas; al reducir significativamente la germinación de las semillas, inhibir el crecimiento de las plántulas y provocar deformaciones en las raíces, que a su vez alteran procesos fisiológicos esenciales en las plantas, tales como la absorción de nutrientes y la actividad enzimática [5].

La coexistencia de metales y detergentes en suelos agrícolas; producto del riego con aguas residuales, crea un escenario complejo desde el punto de vista fisicoquímico, al modificar significativamente sus propiedades, influyendo en la movilidad, disponibilidad y la traslocación de diferentes metales, con cambios que pueden tener consecuencias significativas para la germinación de semillas y el desarrollo de las plantas [6]. Se ha propuesto al bismuto como una alternativa de baja toxicidad para sustituir a metales pesados más tóxicos como el plomo. Sin embargo la investigación sobre la fitotoxicidad del bismuto ha sido limitada en comparación con otros metales pesados, particularmente en sus efectos a largo plazo y sus interacciones con otros contaminantes [7].

La sandía de ratón (*Melothria scabra*), es una cucurbitácea nativa de América con amplia distribución en México, que ha emergido como un modelo prometedor para estudios agronómicos y ecológicos. Características como: su cultivo de rápido crecimiento, alta producción de semillas y adaptación a diversas condiciones ambientales, la convierten en una especie ideal para evaluar los efectos de diversos contaminantes en las primeras etapas de desarrollo de las plantas. Además, su importancia cultural y nutricional en México la posiciona como un cultivo no convencional emergente de interés para la agricultura sostenible y la seguridad alimentaria. El alto número de semillas, su pequeño tamaño y rápida germinación permite proponerla como modelo de estudio en ensayos toxicológicos [8].

En este estudio, se evaluarán los efectos combinados de una sal de bismuto y un detergente líquido comercial así como un detergente para ropa en polvo sobre la germinación y el crecimiento inicial de *M. scabra*. El objetivo es determinar cómo la interacción de estos compuestos afectan la viabilidad de las semillas y el desarrollo de las plántulas, empleando una especie emergente no convencional, los resultados nos permitirán ampliar nuestra comprensión de los impactos ambientales de estas sustancias.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material biológico

Frutos de sandía de ratón (*M. scabra*) se adquirieron en un mercado local de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México; en julio del 2023. Estos frutos fueron cultivados en los municipios de Naolinco y Jilotepec. Se eligieron frutos maduros y en buen estado, los cuales se transportaron a temperatura ambiente en una bolsa de papel al laboratorio. Los frutos fueron cortados a la mitad y se extrajo la pulpa de su interior; la cual fue tamizada para separar las semillas, que posteriormente fueron lavadas con abundante agua para eliminar los restos de pulpa y colocadas sobre papel filtro para secarlas a temperatura ambiente, agitándolas continuamente para evitar que se adhirieran al papel o entre ellas. Cinco días después, las semillas secas fueron guardadas en un recipiente de plástico cerrado hasta su uso, y se utilizaron dentro de las siguientes dos semanas. Nitrato de bismuto pentahidratado ($\text{BiNO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\geq 98\%$, marca MEYER) fue empleado como fuente de bismuto. Como detergente se empleó un lavatrastes líquido comercial de marca líder cuya composición incluye: alquil sulfonato de sodio, alcohol etoxilado (EO 10), alquil sulfonato de magnesio, óxidos de amina, alquil sulfonato de trietanolamina, y otros aditivos (etanol, perfume, EDTA tetrasódico, colorantes, preservantes. A fin de comparar el efecto de las dos principales presentaciones comerciales de detergente, se empleó un detergente para ropa en polvo cuya composición incluye: agentes tensoactivos aniónicos lineales (dodecilbencen sulfonato de sodio), tripolifosfato (P_2O_5), silicato, carbonato, sulfato, agente antirredepositante y perfume.

Técnica de germinación de semillas en papel húmedo

A fin de evaluar el impacto de las soluciones de Bi y/o detergente en la germinación y desarrollo temprano de semillas de sandía de ratón, se llevó a cabo un ensayo estándar de germinación sobre papel filtro en cajas de Petri. Se sembraron 20 semillas por réplica sobre discos de papel Whatman No. 1, los cuales fueron previamente esterilizados y saturados con 10 mL de cada solución de prueba.

Posteriormente, las cajas Petri que contenían los discos fueron incubadas a temperatura ambiente con condiciones de temperatura, humedad y luz constantes. Se adicionó un mL de agua destilada estéril cada tercer día a cada contenedor para compensar las pérdidas por eva-

poración. Al día cinco posterior a la siembra se evaluó el número de semillas germinadas, aplicando el criterio de considerar como semilla germinada aquella que presentó una radícula emergente de al menos 2 mm de longitud. A cada plántula se le determinaron los parámetros morfológicos de longitud y peso fresco de raíz y tallo. El ensayo se realizó por triplicado.

Diseño de experimentos

Se evaluaron 10 combinaciones únicas de concentraciones de bismuto y detergente, generadas a partir de un diseño factorial 2×6 (figura 1). Para la variable concentración de detergente líquido lavatrastes, las semillas fueron expuestas a seis niveles (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 y 1.25 ml/L); para la variable concentración de detergente para ropa, se emplearon seis niveles (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 y 1.25 g/L). Para la variable concentración de bismuto se evaluaron dos niveles (0 y 20 mg/L).

Análisis estadístico

La recopilación de datos se efectuó empleando el software Excel 2010. El análisis estadístico y gráfico de los datos se realizó empleando el software OriginPro 2021. En el análisis estadístico descriptivo para los promedios de los porcentajes de germinación acumulada diaria, se omitió la desviación estándar a fin de observar con claridad el comportamiento de los perfiles para cada tratamiento.

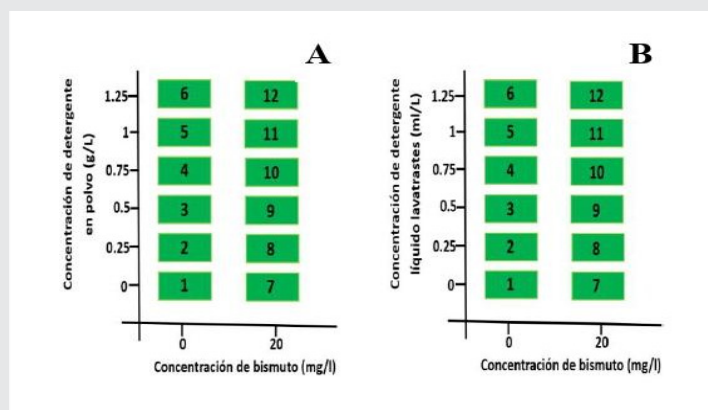


Figura 1.- Diseño experimental factorial 6×2 para evaluar el efecto combinado de dos niveles de bismuto (0 y 20 mg/L) y seis niveles de detergente en polvo y líquido (0-1.25 g/L y 0-1.25 ml/L, respectivamente) sobre la germinación de semillas de sandía de ratón (*Melotria scabra*). (A) Detergente en polvo. (B) Detergente líquido.

Para establecer diferencias significativas al día seis posterior a la siembra, se aplicó la transformación arcoseno y se comprobó la normalidad de los datos, a fin de aplicar la prueba posthoc de Tukey.

Para los datos de longitud y peso de tallo y raíz, se evaluó la normalidad de los datos y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilks y Levene. Como prueba de hipótesis se empleó la prueba ANOVA de dos vías, ($p < 0.05$). La significancia entre medias se verificó mediante la prueba post-hoc de Tukey.

RESULTADOS

Germinación acumulada de semillas de Sandía de ratón (*M. scabra*)

Se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de dos tipos de detergentes domésticos comunes (lavatrastes y ropa) y un metal verde; el bismuto, sobre la germinación de semillas de *M. scabra*. La figura 2 muestra los perfiles del promedio diario de germinación acumulada de semillas de sandía de ratón durante 6 días posteriores a la siembra, iniciando la germinación al día 1 posterior a la siembra y evidenciando una respuesta diferencial de las semillas a los diferentes compuestos evaluados.

El panel A muestra el efecto inhibitorio del detergente líquido lavatrastes sobre la germinación de semillas de *M. scabra*. El control negativo, tratado únicamente con agua purificada, alcanzó un porcentaje de germinación de aproximadamente 70%. Sin embargo; al incrementar la concentración del detergente, se observó una disminución gradual en la germinación, alcanzando un mínimo de menos del 20% a la concentración más alta evaluada (1.25 ml/L). Estos resultados sugieren una clara relación dosis-respuesta entre la concentración del detergente y la inhibición de la germinación. El panel B presenta el efecto combinado del detergente líquido y el bismuto sobre la germinación de semillas. La línea negra, correspondiente al tratamiento con bismuto solo, muestra un perfil de germinación muy similar al del control negativo (agua purificada), sugiriendo que a una concentración de 20 mg/L, el bismuto por sí solo no inhibe la germinación de esta especie. Al combinar el detergente líquido con bismuto, se observó una atenuación del efecto inhibitorio del detergente sobre la germinación, lo que sugiere una interacción antagonista entre ambos contaminantes.

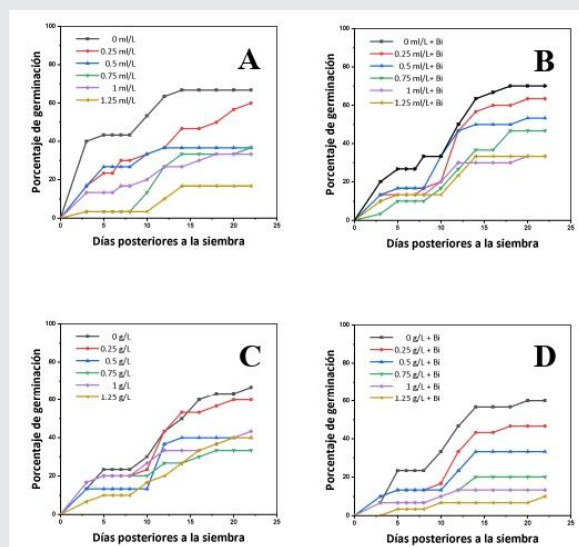


Figura 2. Promedio diario del porcentaje de germinación del efecto de diferentes concentraciones de detergente líquido lavatrastes (panel A y B) y detergente en polvo (panel C y D) sobre el porcentaje de germinación diario de semillas de *M. scabra*. Se evaluó además el efecto de las interacciones del detergente con dos niveles de bismuto (panel B y panel D). Las concentraciones de cada tratamiento y su correspondiente color se presentan en el recuadro.

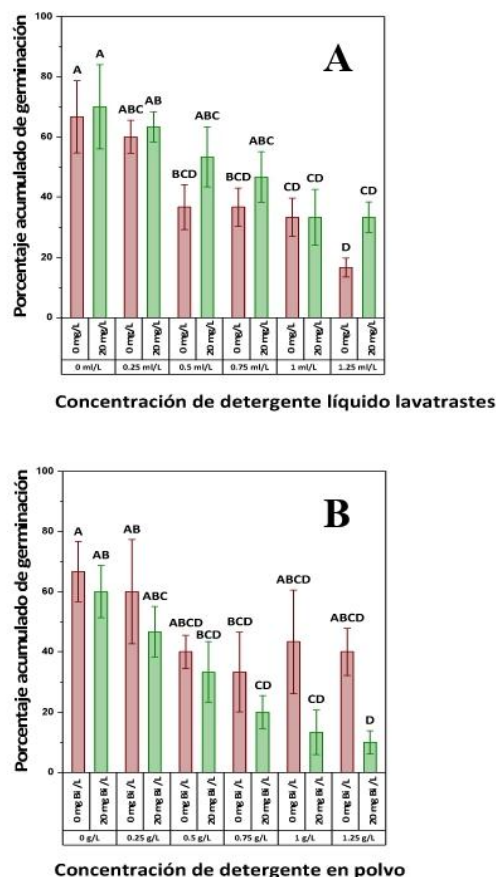


Figura 3. Efecto de diferentes concentraciones de detergente líquido y en polvo, en ausencia y presencia de 20 mg/L de bismuto, sobre el porcentaje de germinación de semillas de *M. scabra* a los 6 días de la siembra. Los datos representan el promedio $\pm$ DE de cada tratamiento. Las letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Sin embargo, un análisis estadístico comparativo al sexto día de evaluación no mostró diferencias significativas entre los tratamientos que incluyeron bismuto, indicando que la disminución gradual en la germinación observada fue principalmente atribuible al detergente y no al bismuto a la concentración evaluada.

La inclusión de un detergente en polvo con una composición distinta permitió evaluar el impacto de diferentes formulaciones de detergentes sobre la germinación.

Los resultados obtenidos con este detergente mostraron una tendencia similar a la observada con el detergente líquido, es decir, una disminución gradual en la germinación a medida que aumentaba la concentración, sin embargo, el efecto inhibitorio del detergente en polvo fue menos marcado, con un porcentaje de germinación acumulado del orden del 30%, a la concentración máxima evaluada (1.25 g/L).

En contraste con los resultados obtenidos con el detergente líquido, la combinación de detergente en

polvo y bismuto produjo un efecto sinérgico sobre la germinación, es decir, el efecto inhibitorio del detergente se vio potenciado por la presencia de bismuto. Un análisis estadístico detallado (figura 3B) reveló que las diferencias en el porcentaje de germinación fueron significativas, en particular al comparar las concentraciones más bajas y más altas de los tratamientos combinados.

Efecto de detergente líquido lavatrastes y bismuto sobre el crecimiento de la plántula

Se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de detergente líquido lavatrastes en presencia y ausencia de bismuto sobre tres variables del crecimiento inicial de plántulas de *M. scabra*. El anexo A muestra que el tratamiento con detergente provocó una disminución significativa en la longitud de tallo (panel A), longitud de raíz (panel B) y peso total de la plántula (panel C) a los 6 días de la siembra. Esta reducción fue proporcional en función de la concentración del detergente. Sin embargo, la adición de bismuto a los tratamientos no modificó significativamente estos efectos.

Los resultados observados indican que el detergente ejerce una toxicidad directa sobre las plántulas de *M. scabra* en las primeras etapas de desarrollo, afectando tanto el crecimiento vegetativo como el peso de la plántula. La disminución en el crecimiento podría deberse a la alteración de procesos fisiológicos esenciales que podrían relacionarse con la absorción de nutrientes. La ausencia de un efecto significativo del bismuto sugiere que la toxicidad del detergente es el factor predominante y apoya el papel del bismuto como metal verde, en este sistema.

Los hallazgos antes mencionados coinciden con estudios previos que reportan efectos inhibitorios de detergentes sobre la germinación y crecimiento de diversas especies vegetales [9]. En consecuencia, los resultados resaltan la importancia de considerar los efectos de los contaminantes domésticos en ecosistemas agrícolas.

Efecto de detergente para ropa en polvo y bismuto sobre el crecimiento de la plántula

Para evaluar el impacto de una segunda presentación de detergente de importancia comercial, se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de detergente en polvo sobre el crecimiento inicial de plántulas de *M. scabra*. El anexo B muestra que el tratamiento con detergente en polvo provocó una disminución significativa en la longitud de tallo, raíz y peso de la plántula únicamente a las concentraciones más altas. Al igual que con el detergente líquido, la adición de bismuto no modificó significativamente estos efectos.

Por tanto, los resultados confirman que el detergente líquido así como en la presentación en polvo ejercen un efecto tóxico sobre las plántulas de *M. scabra*,

afectando negativamente su crecimiento inicial. Sin embargo, es importante destacar que la magnitud de este efecto puede variar entre los diferentes tipos de detergente y sus concentraciones.

Aunque ambos detergentes mostraron efectos inhibitorios, el detergente líquido presentó un efecto más pronunciado en las condiciones experimentales evaluadas, aunque no se estableció equivalencia entre ambos detergentes.

Los presentes resultados son consistentes con estudios previos que reportan los efectos negativos de los detergentes sobre la germinación y el crecimiento inicial de diversas plantas [9]. Estos resultados subrayan la importancia de considerar los efectos combinados de diferentes contaminantes, como detergentes y metales en ecosistemas agrícolas.

DISCUSIÓN

El bismuto es un metal menor que ha sido propuesto como una alternativa más segura y de baja toxicidad, comparado a otros metales pesados como plomo; sin embargo, estudios recientes han revelado efectos adversos significativos en procesos esenciales para la germinación y desarrollo inicial de las plantas, como la fotosíntesis y la absorción de nutrientes [10, 11].

La concentración de Bi empleada fue de 20 mg/L, comparables a las aplicadas en estudios en tomate (*Solanum lycopersicum*) [12] y *Arabidopsis thaliana* [13], donde mostraron efectos adversos severos durante la germinación y el crecimiento de la plántula; sin embargo en nuestro estudio solo se observaron disminuciones significativas durante la fase de germinación de la semilla de *M. scabra*. En contraste, *Lepidium sativum* mostró una mayor tolerancia al Bi, evidenciando efectos tóxicos solo a concentraciones diez veces superiores [14]. Dichos resultados, junto con otros estudios que han evaluado la sensibilidad de diversas especies a este metal, subrayan la variabilidad de diferentes especies en la respuesta al bismuto y la importancia de considerar factores como la especie, la etapa de desarrollo y las condiciones ambientales al evaluar los efectos toxicológicos de este metal.

La exposición de semillas de *M. scabra* a distintas concentraciones de detergente líquido y en polvo, ambos conteniendo agentes tensoactivos aniónicos comúnmente encontrados en aguas residuales, resultó en una disminución significativa en los índices de germinación y crecimiento de las plántulas. Los resultados presentados corroboran estudios previos sobre los efectos de estos compuestos en esta especie [8]. Los efectos adversos observados podrían atribuirse a múltiples mecanismos reportados en otras especies, incluyendo el daño a las membranas celulares, la inhibición de la fotosíntesis, la alteración de la absorción de nutrientes y la generación de especies reactivas de oxígeno [15].

Con respecto a la interacción de ambos contaminantes, estudios previos en *Populus alba* han demostrado una sinergia entre el detergente SDS (detergente aniónico) y el metal pesado zinc, incrementando la translocación del zinc a las hojas, sin embargo, nuestros resultados con *M. scabra* sugieren una respuesta diferencial. A pesar de observar una ligera disminución en la germinación ante la exposición conjunta a bismuto y detergente, no se evidenciaron efectos significativos sobre otras variables fisiológicas. Estos hallazgos indican que la sensibilidad a la combinación de contaminantes puede variar considerablemente entre especies, lo cual resalta la importancia de evaluar los efectos de forma individualizada para cada organismo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la especie *M. scabra* presenta tolerancia a la exposición individual y combinada de bismuto y subraya el papel de baja toxicidad de este metal. En contraste, esta especie es susceptible a la presencia de detergentes tanto líquido como en polvo en las condiciones evaluadas. A diferencia de lo reportado para otras especies, como con la especie *Populus alba*, donde se ha observado una sinergia entre un metal pesado y un detergente aniónico [7], nuestros hallazgos sugieren que la respuesta a contaminantes puede variar significativamente entre especies y depender de factores intrínsecos de cada organismo. Estos resultados subrayan la complejidad de las interacciones entre múltiples contaminantes y la necesidad de realizar estudios específicos para cada especie y matriz ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Raimi, M. O., Abiola, I., Alima, O., & Omini, D. E. (2021). *Exploring how human activities disturb the balance of biogeochemical cycles: Evidence from the carbon, nitrogen and hydrologic cycles. Nitrogen and Hydrologic Cycles. Research on World Agricultural Economy* 2(3): 23-44.
- [2] Naidu, R., Biswas, B., Willett, I. R., Cribb, J., Singh, B. K., Nathanail, C. P., ... & Aitken, R. J. (2021). *Chemical pollution: A growing peril and potential catastrophic risk to humanity. Environment International*, 156, 106616.
- [3] Ungureanu, E. L., & Mustatea, G. (2022). *Toxicity of heavy metals. En Kumar V., Sharma A. and Cerda A. (Eds.) Heavy Metals in the Environment: Impact, Assessment, and Remediation (pp. 1-7). Elsevier Inc.*
- [4] Uzma, S., Khan, S., Murad, W., Taimur, N., & Azizullah, A. (2018). *Phytotoxic effects of two commonly used laundry detergents on germination, growth, and biochemical characteristics of maize (Zea mays L.) seedlings. Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-14.

[5] Heidari, H. (2013). Effect of irrigation with contaminated water by cloth detergent on seed germination traits and early growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Notulae Scientia Biologicae*, 5(1), 86-89.

[6] Pierattini, E. C., Francini, A., Raffaelli, A., & Sebastiani, L. (2018). Surfactant and heavy metal interaction in poplar: a focus on SDS and Zn uptake. *Tree physiology*, 38(1), 109-118.

[7] Passatore, L., Pietrini, F., Carloni, S., Massimi, L., Giusto, C., Zacchini, M., & Iannilli, V. (2022). Morpho-physiological and molecular responses of *Lepidium sativum* L. seeds induced by bismuth exposure. *Science of the Total Environment*, 831, 154896.

[8] Alarcón, R. E. C., Núñez, G. G., Vicencio, O. J. E., & Hernández, A. C. (2023). Efecto fitotóxico de productos de limpieza comerciales sobre la germinación y crecimiento inicial de *Melotria scabra* (sandía de ratón). *Revista IPSUMTEC*, 6(2), 17-23.

[9] Bello P. J., Grosskelwing N. G., Cuevas A. R. E., Mejía M. L. y Cabrera H. A. (2022) Efecto de metales pesados sobre la germinación de las semillas de Chumpipe (*Gonolobus niger*). *Revista Ingeniantes*, 2(1): 36-42.

[10] Omouri, Z., Hawari, J., Fournier, M., & Robidoux, P. (2019). Phytotoxicity of bismuth nitrate and bismuth citrate on germination and growth of *Lolium perenne* exposed on filter paper and on artificially contaminated soil. *Journal of Soil Science & Plant Health*, 3(1).

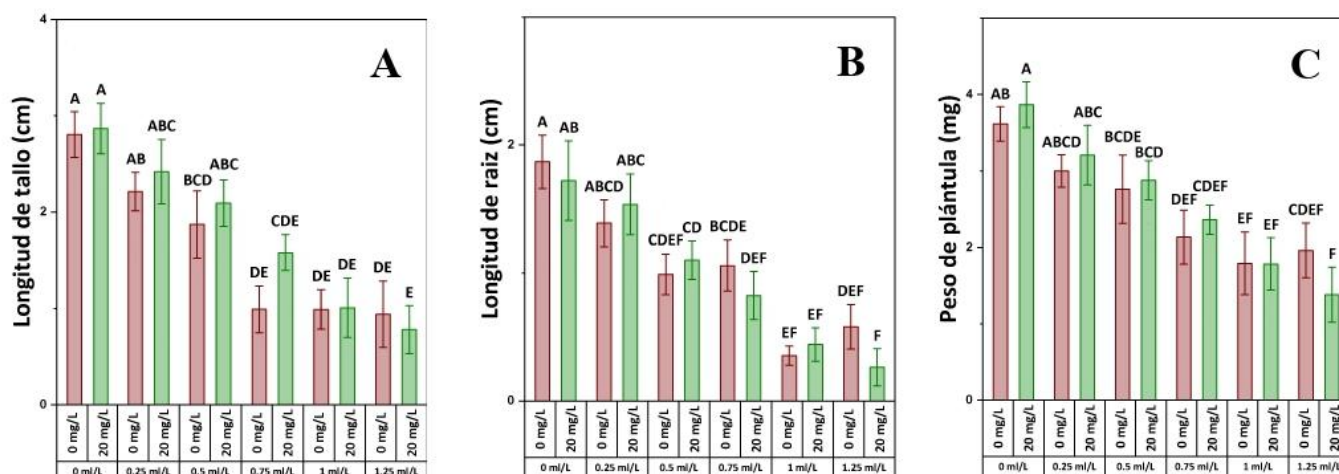
[11] Zacchini, M. (2024). Bismuth interaction with plants: uptake and transport, toxic effects, tolerance mechanisms-a review. *Chemosphere*, 142414.

[12] Nagata, T., & Kimoto, S. (2020). Growth inhibition and root damage of bismuth in *Solanum lycopersicum*. *SCIREA J. Biol*, 54, 72-86.

[13] Nagata, T. (2015). Growth inhibition and IRT1 induction of *Arabidopsis thaliana* in response to bismuth. *Journal of plant biology*, 58, 311-317.

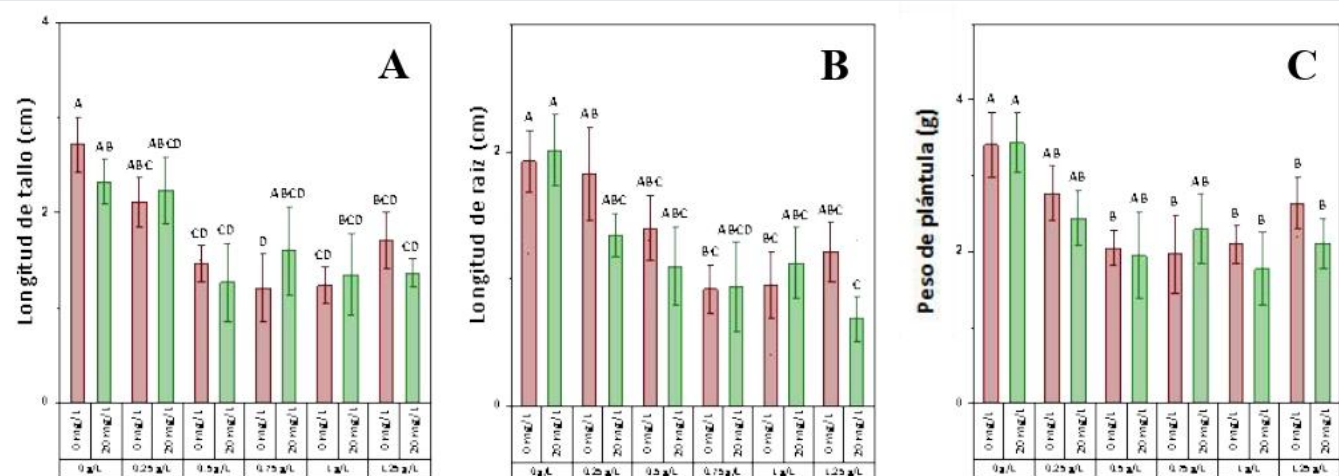
[14] Passatore, L., Pietrini, F., Carloni, S., Massimi, L., Giusto, C., Zacchini, M., & Iannilli, V. (2022). Morpho-physiological and molecular responses of *Lepidium sativum* L. seeds induced by bismuth exposure. *Science of the Total Environment*, 831, 154896.

[15] 19.Uzma, S., Khan, S., Murad, W., Taimur, N., & Azizullah, A. (2018). Phytotoxic effects of two commonly used laundry detergents on germination, growth, and biochemical characteristics of maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-14.



Concentración de detergente líquido lavatrastes

Anexo A. Efecto de tratamientos con detergente líquido a diferentes concentraciones en ausencia y presencia de 20 mg/L de bismuto sobre el crecimiento de plántulas de *Melotria scabra* a los 6 días de la siembra. Se evaluaron la longitud de tallo (A), longitud de raíz (B) y el peso total de la plántula (C). Los datos representan el promedio $\pm$ DE de cada tratamiento. Las letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).



Concentración de detergente en polvo

Anexo B. Efecto de tratamientos con detergente en polvo a diferentes concentraciones en ausencia y presencia de 20 mg/L de bismuto sobre el crecimiento de plántulas de *Melotria scabra* a los 6 días de la siembra. Se evaluaron la longitud de tallo (A), longitud de raíz (B) y el peso total de la plántula (C). Los datos representan el promedio $\pm$ DE de cada tratamiento. Las letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).



Mecánica *de* Materiales

Ingeniantes

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de la lechada cemento hidráulico con polietilén-tereftalato (PET)



Colaboración

Raúl Enrique Contreras Bermúdez; Stefany Pamela Villegas Zenil, Universidad Veracruzana / Zona Poza Rica-Tuxpan; Heriberto Esteban Benito, Instituto Politécnico Nacional de México / CIIEMAD; Alejandra Velasco Pérez; Tania García Herrera, Universidad Veracruzana / Zona Orizaba-Cordoba

Fecha de recepción: 04 de junio de 2024

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2024

RESUMEN: El uso de partículas de polietileno tereftalato (PET) para mejorar las propiedades del concreto hidráulico es un tema de interés para la industria de la construcción. El PET aporta varias características al concreto hidráulico, como una mejor resistencia térmica, cambios en la viscosidad, resistencia a la compresión, entre otras. Estas características del concreto son adecuadas para abordar los desafíos de la construcción moderna. En el presente trabajo se utilizó un porcentaje de 10, 20 y 30 % en peso de partículas de PET para modificar las propiedades de la lechada de cemento clase H, a las mezclas resultantes se les determinó viscosidad, contenido de agua libre y resistencia a la compresión. Los resultados demostraron que una lechada de cemento modificada con 20% en peso de PET presentó las características más idóneas para ser usado en la cementación de pozos petroleros.

PALABRAS CLAVE: PET, cemento, reciclado, propiedades mecánicas.

ABSTRACT: The use of polyethylene terephthalate (PET) particles to improve the properties of hydraulic concrete is a topic of interest to the construction industry. PET contributes several characteristics to hydraulic concrete, such as improved thermal resistance, changes in viscosity, compressive strength, among others. These characteristics of concrete are suitable to address the challenges of modern construction. In the present work, a percentage of 10, 20 and 30 wt.% of PET particles were used to modify the properties of class H cement slurry, the resulting mixtures were determined for viscosity, free water content and compressive strength. The results showed that a cement slurry modified with 20% by weight of PET had the most suitable characteristics for use in oil well cementing.

KEYWORDS: PET, cement, recycling, mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos constituyen una preocupación primordial debido a que son materiales poliméricos derivados del petróleo, cuya estructura, formada por largas cadenas de monómeros, dificultan su biodegradación, la cual puede tardar entre 450 y 1,000 años en condiciones ambientales [1]. Esto genera un daño significativo a los ecosistemas marinos al acumularse en ellos, y al mismo tiempo representan una amenaza para la salud pública. Se estima que entre el 10% y el 15% de los residuos plásticos

terminan en los océanos, y durante el proceso de degradación el tereftalato de polietileno (PET) libera microplásticos que entran a la cadena alimentaria.

Por otro lado, el PET que pertenece a la familia de los poliésteres, se han convertido en un material ampliamente utilizado en la vida cotidiana debido a su versatilidad y múltiples aplicaciones. Su creciente demanda ha impulsado un aumento en su producción en los últimos 65 años; se estima que actualmente se producen alrededor de 30 millones de toneladas de plásticos anualmente, con un incremento del 4% anual [2], [3]. El PET se utiliza comúnmente en la fabricación de botellas, envases para alimentos, bebidas y productos de cuidado personal. Este material destaca por su excelente capacidad de formar una barrera contra el oxígeno y dióxido de carbono, lo que lo hace ideal para prolongar la vida útil de los productos envasados. Entre sus principales características se encuentra su gran ligereza y excelente resistencia mecánica, se produce a partir del petróleo crudo (64%), derivados líquidos del gas natural (23%) y aire (13%) [4].

El PET ha sido objeto de diversas investigaciones y avances tecnológico con el propósito de disminuir su impacto ambiental [2]. En el proceso de reciclaje, este termoplástico se somete a un proceso de limpieza, trituración y fundición para obtener una resina con características fisicoquímicas adecuadas para la fabricación de nuevos productos. En el ámbito de la ingeniería de pavimentos, se está explorado el potencial del PET y la implementación de técnicas innovadoras para prolongar la durabilidad de los pavimentos a bajo costo [5]. Este tema es de gran interés en ámbito de la construcción sostenible. Al-Hadithi et al. [6] reportaron la modificación de losas de concreto mediante la adición de diferentes porcentajes de fibras plásticas, con el objetivo de incrementar la resistencia a la compresión y a la flexión.

Por su parte, Ojeda et al. [7], incorporaron fibras de PET como componente en el mortero de cemento, logrando un mejor desempeño mecánico tanto en la compresión como en resistencia a la flexión, en comparación con fibras comerciales de nailon. Además, el PET ha sido utilizado como sustituto de la arena y, también combinado con fibras de polipropileno, como material aditivo en las mezclas de hormigón [2]. También, se han reportado estudios en los que la modificación del concreto hidráulico con sílice obtenida por calcinación de cascarilla de arroz ha demostrado mejoras significativas en sus propiedades mecánicas [8].

En la industria petrolera, las mezclas de cemento tipo lechada desempeñan un papel fundamental para garantizar la estabilidad del pozo petrolero, revestir tuberías, recubrir las formaciones rocosas expuestas y aislar zonas para prevenir la comunicación de fluidos entre distintas zonas [9]. No obstante, cuando la le-

chada no cumple adecuadamente con tales funciones, pueden surgir diversos problemas relacionados con su desempeño y eficiencia, tales como pérdida de hidrocarburos, filtración de fluidos inyectados, pérdida de circulación cuando la lechada se filtra hacia la formación poroso o fracturada, y contaminación de mantos freáticos.

Cada pozo presenta condiciones específicas de presión, temperatura y composición del subsuelo, lo que hace que el diseño de una lechada sea un desafío técnico considerable en términos de estabilidad y adherencia. Además, las variaciones en la calidad de los materiales empleados, como el cemento Portland y los aditivos, pueden alterar significativamente las propiedades esperadas de la mezcla y su rendimiento a condiciones de operaciones reales.

El control de la viscosidad y el tiempo de fraguado de la lechada son esenciales para un adecuado bombeo y evitar problemas de sedimentación de partículas y endurecimiento prematuro. En este trabajo se reporta el aprovechamiento del tereftalato de polietileno (PET) recolectado de los Residuos Sólidos Urbanos de la ciudad de Poza Rica de Hidalgo, Veracruz, para mejorar las propiedades mecánicas de la lechada de cemento con potencial aplicación en los pozos de perforación.

MATERIAL Y MÉTODOS

En la Figura 1 se muestra un esquema general de la metodología utilizada para la preparación de la lechada de cemento tipo H. Este tipo de cemento ha sido seleccionado debido a sus propiedades, entre las que se incluyen su alta resistencia a la compresión, elevada resistencia al ataque químico, fundamentalmente para aplicaciones en cementación de pozo; su capacidad de lograr un rápido sellado hidráulico entre las capas del subsuelo que evita la filtración de fluidos y su bajo requerimiento de aditivos que facilita la simplicidad del proceso de preparación.

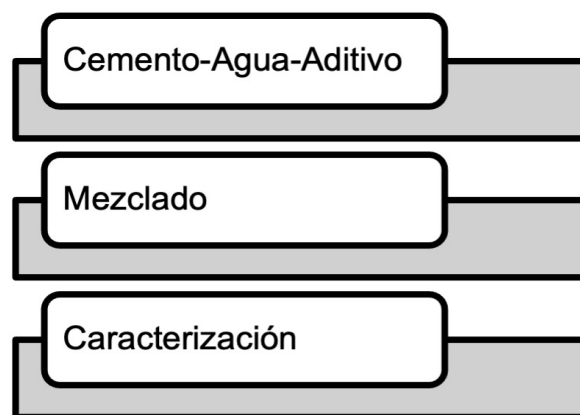


Figura 1. Metodología para preparación de la lechada de cemento tipo H.

Fuente: Elaboración propia.

La lechada de cemento se llevó a cabo mezclando 700 g de cemento tipo "H" con 46% de agua destilada a 4,000 rpm durante 15 segundos. A continuación, se añadieron partículas de PET, previamente lavadas y secadas, con tamaños entre ¼ y ½ pulgadas, en proporciones de 10, 20 y 30% p/p respecto al cemento. La mezcla se continuó mezclando a 12,000 rpm por 35 segundos para garantizar una homogeneización completa.

La lechada obtenida, con diferentes porcentajes de aditivo, se caracterizaron para determinar su densidad utilizando una balanza de lodos (marca FANN). Las propiedades reológicas se evaluaron mediante un consistómetro atmosférico y un viscosímetro rotacional, operado a la temperatura de interés durante 20 min. El contenido de agua libre se calculó depositando una cantidad conocida de lechada de cemento en una probeta de 250 mL, dejándola en reposo durante 120 min y se procedió a medir la cantidad de agua libre separada. Finalmente, la pérdida por filtración se determinó depositó la lechada de cemento en una celda estática, aplicando una presión de 1,000 PSI sobre un filtro de prensa con malla 325 durante 30 min.

RESULTADOS

La Tabla 1 muestra un resumen de las propiedades físicas de la lechada de cemento modificada con 10, 20 y 30% p/p de partículas de PET. La densidad de estas lechadas prácticamente se mantuvo constante, lo que sugiere que la adición del polímero no afectó significativamente el comportamiento del fluido en estado fresco antes del fraguado. Cabe mencionar, que la densidad de las lechadas modificadas fueron ligeramente menores en comparación con la lechada sin modificar, debido a la relación del sistema PET-cemento tipo "H", lo que resulta en mezclas más ligeras y también adecuada para aplicaciones en estructuras sometidas a bajas cargas, donde una densidad reducida puede ser ventajosa. Estos resultados son similares a los reportados previamente por Alesmar et al. [4], quienes también observaron que la incorporación de partículas de PET contribuye a una menor densidad sin comprometer las propiedades fisicoquímicas del material.

Cabe mencionar que un aspecto importante es la correlación entre la densidad, la viscosidad plástica (V_p) y el punto de cedencia de las lechadas. Los datos de la tabla muestra que el punto de cedencia disminuyó de 111 lb/100ft² a 16.3 lb/100 ft², este comportamiento indica que las partículas de PET reducen las fuerzas interparticulares dentro de la mezcla. Por otro lado, al aumentar el porcentaje del polímero, también la V_p aumento proporcionalmente su valor, atribuido a la interacción física entre las partículas de PET y la matriz del cemento dando como resultado una mezcla pastosa con mayor hermeticidad ideal para minimizar la filtración de fluidos.

Una densidad controlada permite mantener una presión hidrostática adecuada en el pozo petrolero, una V_p optimizada mejora proporciona un flujo uniforme de la lechada y evita la formación de segregaciones. Finalmente, un punto de cedencia bajo facilita el bombeo inicial. Estos parámetros físicos son de suma importancia para diseñar lechadas de cemento para pozos petroleros que operan a diferentes condiciones de presión, temperatura y composición de subsuelo.

Tabla 1. Resultados de las pruebas de la lechada realizados a temperatura y presión atmosférica.

	Aditivo PET (% p/p)			
	0	10	20	30
Peso (g)	--	0.7	1.05	1.75
Densidad (kg/m³)	1.84	1.20	1.20	1.20
Viscosidad plástica (cp)	63.4	183.2	215.7	277.6
Punto de cedencia (lb/100 ft²)	111	16.3	19.9	30.8
Pérdida por filtración (mL)	37	32	36	34

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se muestra el resultado de las pruebas reológicas de la lechada de cemento modificada a diferentes concentraciones de PET. La naturaleza no lineal de este comportamiento sugiere que la lechada exhibe características de un fluido no Newtoniano, una característica típica del cemento Apasco Clase "H". Por otra parte, la muestra modificada con un 10% peso de PET presenta una reducción en el esfuerzo cortante, a medida que aumenta la tasa de corte, este comportamiento indica un potencial ahorro de energía al momento de realizar el bombeo de la lechada. Por el contrario, a concentraciones más altas de PET 20 y 30% peso los puntos 100 y 200 rpm muestran un esfuerzo cortante mayor, por lo que se requerirá mayor energía de bombeo inicial.

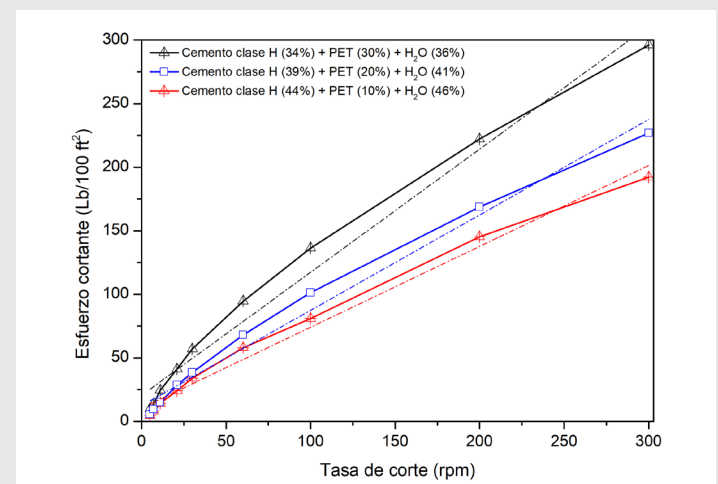


Figura 2. Pruebas reológicas de la lechada.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3 muestra el comportamiento reológico de la lechada obtenido a partir de la aplicación del modelo de ley potencias, el cual describe el comportamiento de los fluidos de perforación base polímero. Además, en la Tabla 2 se presenta la ecuación de regresión exponencial, que facilita el estudio de la variabilidad de la viscosidad. Esta ecuación y su correlación permite realizar un pronóstico más preciso de la relación entre partículas de PET, agua y cemento.

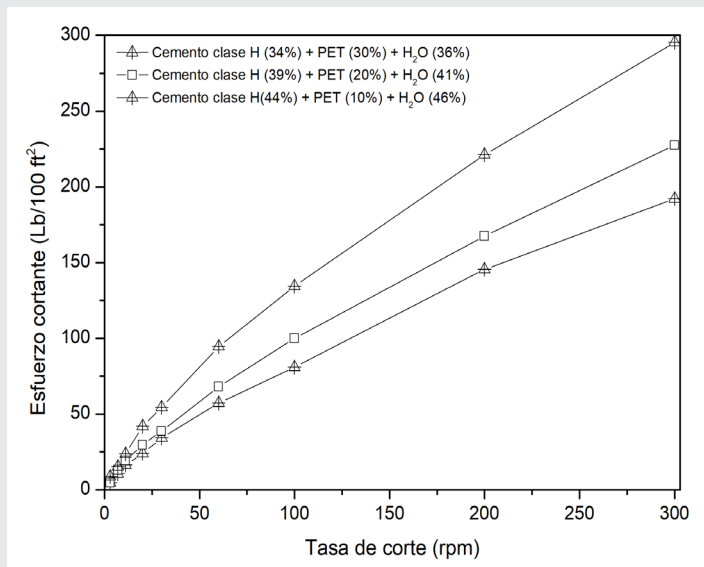


Figura 3. Pruebas reológicas de la lechada modificada con PET a partir de la ley de potencia.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Modelos exponenciales calculada por la ley de potencias.

Mezcla	Modelo	Correlación
34% cemento + 30%PET + 36% H ₂ O	$y = 4.359x^{0.7436}$	0.9962
39% cemento + 20%PET + 41% H ₂ O	$y = 2.5496x^{0.7954}$	0.9990
44% cemento + 10%PET + 46% H ₂ O	$y = 2.2131x^{0.789}$	0.9992

Fuente: Elaboración propia.

El valor de la V_p de la lechada de cemento aumentó de manera significativa con el contenido de PET, pasando de 183.2 cp con un 10% a 277.6 cp con un contenido de 30% de PET (ver Figura 4). El aumento de la V_p se atribuye principalmente a dos factores. En primer lugar, al aumenta la concentración de partículas de PET en la lechada, se produce una mayor interacción molecular entre las cadenas del polímero, lo que provoca una mayor resistencia al flujo y, por consiguiente, un aumento en la viscosidad de la mezcla de cemento. En segundo lugar, es debido al tamaño y distribución de partículas de PET: a mayor tamaño de partículas, hay mayor obstrucción del fluido y resistencia al movimiento, lo que resulta una mayor viscosidad de la mezcla.

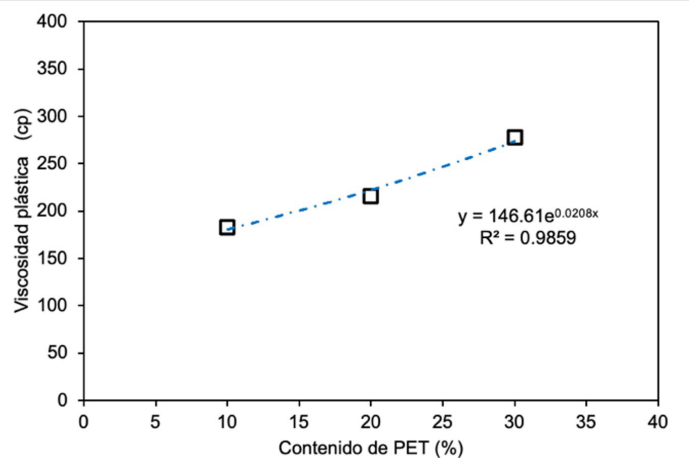


Figura 4. Variación de la V_p de la lechada en función del contenido de PET.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La lechada de cemento modificada con 10% de PET presente menor resistencia al flujo debido a que su punto de cedencia es bajo, lo que resulta en una cantidad mínima de fuerza sobre área superficial y permite cambiar de flujo laminar a turbulento. Sin embargo, cuando se requiere una mayor permeabilidad y un flujo estable para bombear cemento en flujo laminar, es adecuado utilizar un cemento polimérico con mayor concentración de PET, el cual es adecuado para la industria de la construcción.

Por otra parte, el cemento clase "H" modificado con partículas de PET resultó adecuado para la industria de la construcción y petrolera, ya que el polímero modifica la permeabilidad del cemento, aumenta la resistencia a la compresión, al ataque químico y bacteriológico. Además, de acuerdo al porcentaje de polímero, puede desarrollar flujos estables o turbulentos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. C. Zambrano Sánchez, G. B. Lacorte Castro, and B. J. Carrillo Anchundia, "Materiales Poliméricos y el impacto ambiental: Una revisión," *Polo de conocimiento*, vol. 7, no. 6, pp. 596-614, 2022, doi: 10.23857/pc.v7i6.4092.
- [2] A. Ramhormozy, E. Kazeminezhad, and S. Safakhah, "Effect of polyethylene terephthalate (PET) and polypropylene (PP) fibers on the shear behavior of RC deep beams," *Revista de la Construcción*, vol. 22, no. 1, pp. 223-241, 2023, doi: 10.7764/RDLC.22.1.223.
- [3] G. Castañeta, A. F. Gutiérrez, F. Nacaratte, and , Carlos A. Manzano, "Microplastics: a Contaminant That Grows in All Environmental Areas, Its Characteristics and Possible Risks To Public

Health From Exposure,” *Revista Boliviana de Química*, vol. 37, no. 3, pp. 160–175, 2020, doi: 10.34098/2078-3949.37.3.4.

[4] L. Alesmar, N. Rendon, and M. E. Korody, “Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET)-cemento,” *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 23, no. 1, pp. 76–86, 2008, [Online]. Available: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S0798-40652008000100006&lang=es.

[5] M. E. Murillo Chacón, M. Carballo Rojas, and M. del C. Gallardo Mejía, “Análisis de una base granular estabilizada con cemento y adición de fibras de PET reciclado,” *Infraestructura Vial*, vol. 25, no. 44, pp. 1–9, 2023, doi: 10.15517/iv.v25i44.54855.

[6] A. I. Al-Hadithi, A. T. Noaman, and W. K. Mosleh, “Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC),” *Compos Struct*, vol. 224, p. 111021, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111021.

[7] J. P. Ojeda, I. T. Mercante, and N. H. Fajardo, “Design and test of recycled plastic fibers for mortar reinforcement,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 36, no. 1, pp. 55–62, 2020, doi: 10.20937/RICA.2020.36.53423.

[8] N. R. Camargo Pérez and C. H. Higuera Sandoval, “Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 1, pp. 91–109, 2017, doi: 10.18359/rcin.1907.

[9] M. T. Maagi, S. D. Lupyana, and G. Jun, “Nanotechnology in the petroleum industry: Focus on the use of nanosilica in oil-well cementing applications - A review,” *J Pet Sci Eng*, vol. 193, p. 107397, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.petrol.2020.107397.





Mecánica *de* Materiales

Ingeniantes

Influence of the filler metal on the microstructure of a 2507 superduplex stainless steel multipass welding



Colaboración

Doris Ivette Villalobos Vera; Ivan Mendoza Bravo;
Gabriela Valerio Canales, Tecnológico Nacional
de México / Instituto Tecnológico de Veracruz

Fecha de recepción: 28 de mayo de 2024

Fecha de aceptación: 15 de octubre de 2024

RESUMEN: Este trabajo estudia la microestructura de un acero inoxidable superdúplex 2507 después de haber sido soldado mediante el proceso GMAW, utilizando dos materiales de aporte ER 2594 y ER 2209. Posteriormente, se analizaron muestras correspondientes al primer cordón de soldadura mediante microscopía óptica, empleando un ataque selectivo para identificar la ferrita, austenita y fase sigma específicamente. Los resultados mostraron la formación de fase sigma en los límites de grano ferrita/austenita en el metal de soldadura con ER 2594, observándose un incremento en la fase austenita y una disminución significativa de la ferrita, indicando la influencia de los elementos de aleación presentes en el material de aporte como el cromo y molibdeno para la formación de fase sigma y el nitrógeno y níquel en la formación de austenita.

PALABRAS CLAVE: acero inoxidable dúplex, proceso GMAW, microestructura, fase sigma.

ABSTRACT: This work studies the microstructural changes of a commercial 2507 superduplex stainless steel that was multipass-welded with the GMAW process using two filler metals ER 2594 and ER 2209. After welding, both specimens were analyzed by means of optical microscopy, using selective etching to identify the ferrite, austenite, and sigma phase. The results showed the formation of sigma phase in the ferrite/austenite grain boundaries in the welding metal obtained with ER 2594 filler metal. The austenite fraction increased and the ferrite was reduced, indicating the influence of alloy elements in the filler metal such as chromium and molybdenum for the formation of sigma phase and nitrogen and nickel for the austenite formation.

KEYWORDS: duplex stainless steel, GMAW process, microstructure, sigma phase.

INTRODUCCIÓN

The use of superduplex stainless steel (SDSS) has been increasing over the years due to their excellent mechanical properties and high corrosion resistance, reason why they are used in the oil and gas industry [1]. Their microstructure consists in ferrite and austenite combining the stress corrosion resistance of ferritic stainless steel with the high

toughness and pitting corrosion resistance of austenitic stainless steel [2]. Its chemical composition is perfectly balanced to stabilize both phases at room temperature and maintain their characteristics and properties. Cr and Mo stabilize the ferrite and Ni and N the austenite [3]. For duplex stainless steels the formation of secondary phases such as sigma phase, carbides, nitrides, or secondary austenite among others is of main concern because they form at high temperatures in the range of 500°C-1000°C [4]. However, the most detrimental is sigma phase, which is an intermetallic compound with high Fe, Cr and Mo contents [5] and is often precipitated in the ferrite/austenite interface when duplex stainless steels are exposed to a high temperature during welding or post-weld heat treatment (6). For that reason, the amount of ferrite present in the microstructure may be related to the susceptibility of sigma phase formation in duplex stainless steels. One approach to predict the fraction of ferrite is to use the Creq/Nieq ratio which also indicates the solidification mode for stainless steels welding metal based on the chemical composition of the filler metal and base metal. For industrial applications the heat affected zone and the welding metal need to deliver at least the same properties of the base metal. Therefore, the selection of the filler metal should be according to their chemical composition, focusing on the the content of ferrite-promoting elements to relate the fraction of ferrite in the welding metal. For superduplex alloys there are two recommended filler metals: ER2209 and ER2594, which chemical composition is responsible to maintain the austenite/ferrite balance of the base metal after welding. They both have different amounts of chromium, molybdenum, nickel and nitrogen. Consequently, sigma phase may form if the filler metal contains high content of chromium and molybdenum since it may promote a high fraction of ferrite, disturbing the ferrite/austenite balance, and affecting the mechanical properties as well as corrosion resistance [7]. The aim of this work is to study the influence of the ferrite-promoting elements in the filler metal on the microstructure of the superduplex stainless steel after being multipass-welded.

MATERIALS AND METHODS

In this work, commercial 2507 superduplex stainless steel plates were used to make two multipass welding joints with the GMAW process and two different filler metals. Plates were 6 mm-thick, solution treated, and water quenched according to the manufacturer. Two filler metals of the duplex type were used ER 2209 and ER 2594, both 1.2 mm in diameter. All plates were prepared with a single V groove, 45° bevel angle, 1 mm root face and 3.2 mm root opening as indicated in Figure 1. The chemical composition of the materials is shown in Table 1, obtained by Optical Emission Spectroscopy.

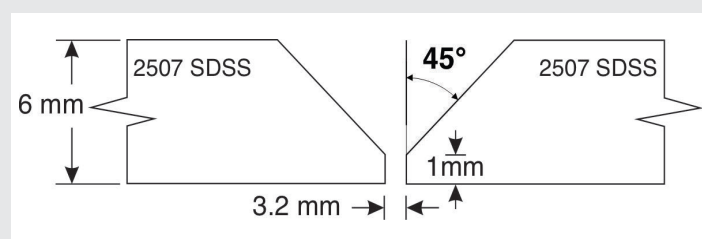


Figure 1. Single V Groove preparation

Fuente: Elaboración propia

Table 1. Chemical composition of base metal and filler metal (%wth)

Material	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	Fe	Creq/Nieq ratio
2507 SDSS	0.05	0.40	0.88	5.78	23.40	3.23	0.27	Bal.	2.02
ER 2594	0.06	0.49	0.50	7.32	21.72	3.00	0.25	Bal.	1.65
ER 2209	0.09	0.45	1.26	7.73	19.98	3.14	0.15	Bal.	1.70

Fuente: Elaboración propia.

To determine the solidification mode for the 2507 SDDS, the Creq/Nieq ratio was calculated using the WRC-1992 diagram formula [8]:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0.7Nb \quad \text{Eq.1}$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35C + 20N + 0.25Cu \quad \text{Eq.2}$$

Welding parameters

To establish the welding parameters and to obtain full penetration without visible defects, test beads were deposited on a sample of superduplex stainless steel plate. To protect the welding metal, argon was used as a shielding gas. Once the parameters were established (Table 2), three welding passes were needed to join the SDSS plates as shown in Figure 2. The three welding passes were deposited continuously.

Table 2. Welding parameters for specimens W2209 and W2594.

Shielding gas	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/s)
Ar	300	30	3

Fuente: Elaboración propia.

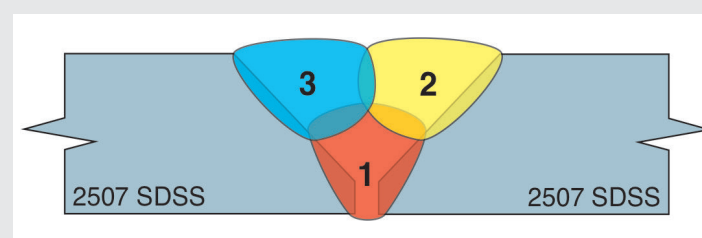


Figure 2. Multipass welding deposition.

Fuente: Elaboración propia.

Microstructural analysis

The microstructural analysis was performed using optical microscopy on samples from the heat-affected zone and the weld metal zone corresponding to the root pass.

The samples were prepared with silicon carbide sandpaper of different grades and polished with diamond paste of 6, 3 and 1 microns. KOH selective etching was used to reveal and identify the secondary phases, which distinguishes between ferrite, austenite, and sigma phase. Subsequently, image analysis was performed to quantify the percentages of the phases present.

RESULTS

Welding Metal

Figure 3 shows the microstructure of the base metal in the as-received condition. Figure 4 and Figure 5 show the welding metal of specimens W2209 and W2594. The original microstructure in Figure 3 shows a ferrite matrix with austenite islands elongated in the rolling direction and free of secondary phases. In contrast, the microstructure in specimen W2209 (Fig.4) shows polygonal austenite formed along with strings of delta ferrite as well as particles of sigma phase. The fraction of austenite increased to $\approx 90\%$ and the content of sigma phase is $\approx 6\%$. For specimen W2594 (Fig. 5) the microstructure depicts an austenite matrix and strings of delta ferrite with butterfly-sigma phase inside. The fraction of austenite is around $\approx 90\%$ and for sigma phase $\approx 10\%$.

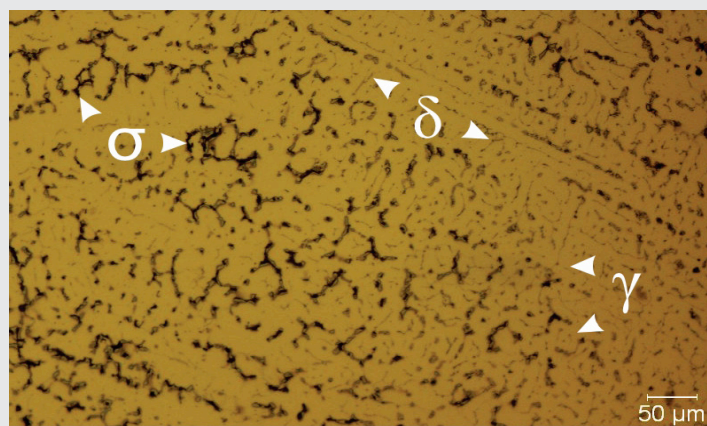


Figure 5. Microstructure of the welding metal in the root pass of specimen W2594.

Fuente: Elaboración propia.

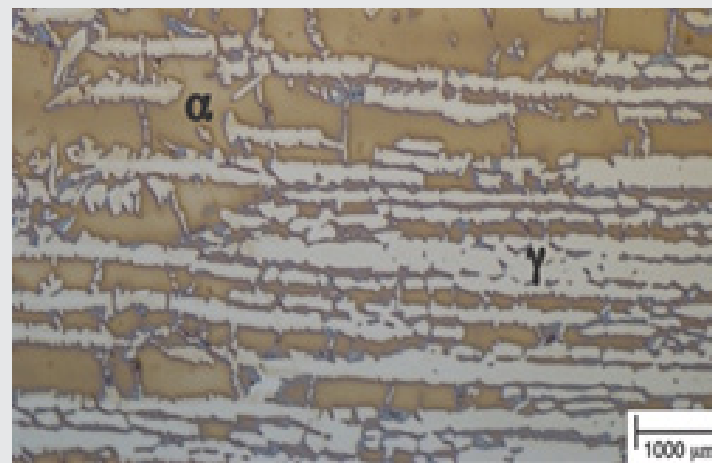


Figure 3. Microstructure of base metal in the as-received condition.

Fuente: Elaboración propia.

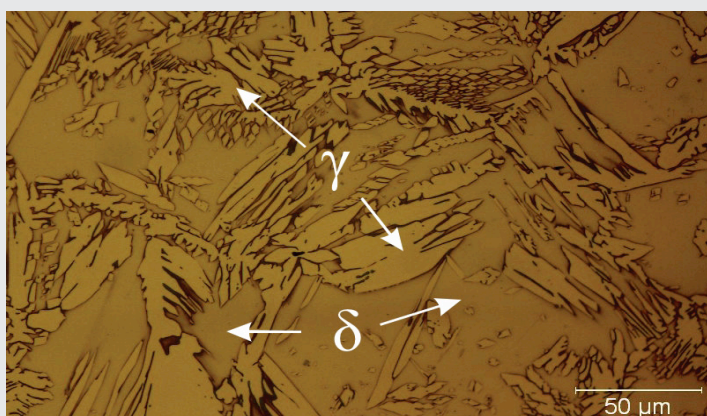


Figure 6. Microstructure of the heat affected zone in the root pass for specimens W2209.

Fuente: Elaboración propia.

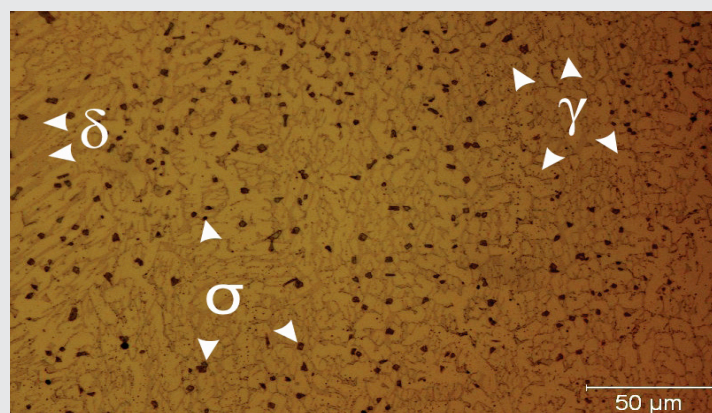


Figure 4. Microstructure of the welding metal in the root pass of specimen W2209.

Fuente: Elaboración propia

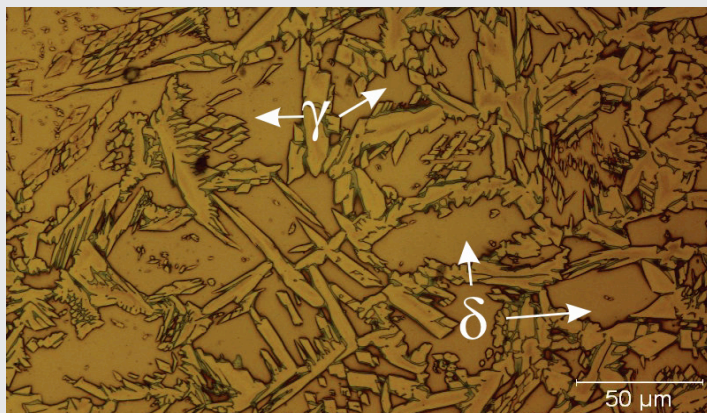
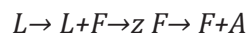


Figure 7. Microstructure of the heat affected zone in the root pass for specimens W2594.

Fuente: Elaboración propia.

Based on the resultant microstructures, the original austenite/ferrite balance is disturbed by the presence of sigma phase and the reduction of ferrite. The microstructure and the properties of the welding metal are generally controlled by the filler metal composition while the microstructure in the heat affected zone is determined by the weld thermal cycle and is therefore very sensitive to variations in the welding conditions [9]. Nevertheless, the sequence of transformation reactions in the welding metal and heat affected zone is the same [10], following:



According to the Creq/Nieq ratio, all commercial duplex stainless steels solidify as 100% ferrite (Figure 8) and the balanced microstructure depends on the solid-state transformation from ferrite to austenite during cooling. The Creq/Nieq ratio is around 2.25 for the 2507 superduplex stainless steel used in this study, indicating the sequence of phase transformation.

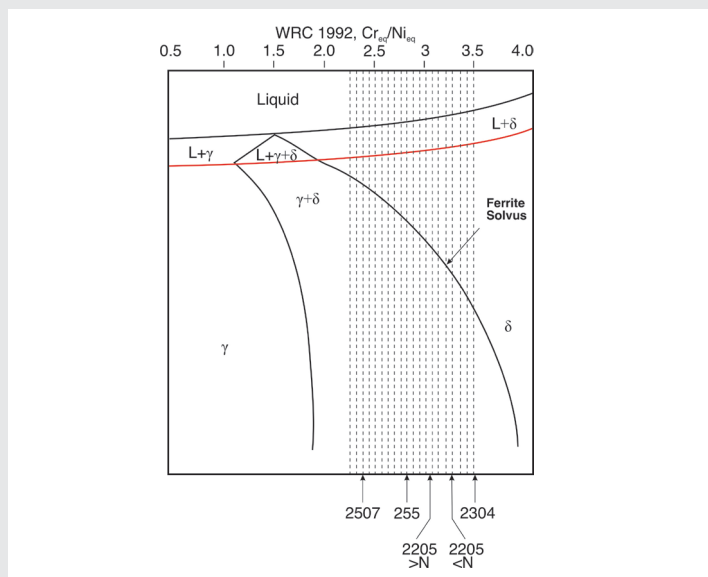


Figure 8. Biphasic region at high temperature in duplex alloys. Dotted lines correspond to the commercial duplex alloys. Fuente: Recuperada de Referencia [11].

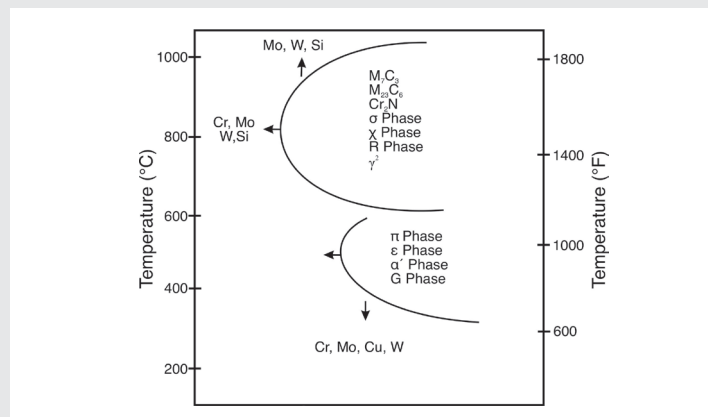


Figure 9. Diagram of secondary phases formation in duplex alloys. Fuente: Recuperada de Referencia [11].

Austenite phase can only nucleate and grow below the ferrite solvus. By controlling the processing temperature and cooling rate from that temperature, the proportion and distribution of both phases can be controlled [11]. During cooling, austenite phase will start to form when the temperature drops below ferrite solvus, and the transformation will increase at a rate controlled by the diffusion of nitrogen in the delta ferrite [12].

Therefore, welding a material that implies only one welding pass, the microstructural balance can be maintained if the cooling from the liquidus temperature is slow enough to permit the solid-state ferrite-austenite transformation, which can be considered as an equilibrium condition. However, during a multipass welding the cooling rate from the liquidus temperature is slow, allowing not only the ferrite-austenite solid state transformation but also the precipitation of secondary phases such as sigma phase in all zones of the joint.

The presence of sigma phase in the welding metal implies that high temperatures and slow cooling were experienced. Based on the diagram of secondary phases precipitation for duplex alloys in Figure 9, the range of temperature was around 1000°C - 600°C, where sigma phase can form along with other secondary phases. Despite there are some other secondary phases in that temperature range, only sigma phase was identified in the specimens.

Sigma phase is an intermetallic phase, hard and brittle which has a complex tetragonal crystal structure with a large unit cell [13]. Sigma is enriched in Cr and Mo relative to the nominal composition of the alloy, and because of this, it grows from the ferrite phase, which is also enriched in these elements, so that sigma nucleates and grow from ferrite with the simultaneous formation of secondary austenite by the eutectoid transformation ferrite→secondary austenite + sigma phase [13]. In duplex stainless steels, sigma phase particles normally nucleate at ferrite-austenite interphase boundaries and grow into the adjacent ferrite grains in the form of a cellular structure consisting of sigma phase and new austenite at temperatures between 675°C and 975 °C [14].

The Cr and Mo atoms would be absorbed from the matrix nearby sigma phase as the sigma precipitation occurred. Hence the corrosion resistance surrounding sigma phase decreased owing to the depletion of Mo and Cr at that local region. This decrease of corrosion resistance is detrimental to the material because that means that in certain service conditions, the material would fail due to the holding at high temperatures below the ferrite solvus for a certain time.

CONCLUSIONS

The formation of sigma phase due to the multipass welding in a 2507 super duplex stainless steel has

been investigated, allowing to summarize the following findings:

1. ER2294 filler metal promotes a high fraction of sigma phase in the welding metal compared to ER 2209 filler metal.
2. Sigma phase forms preferentially in the microstructure of the welding metal due to the high temperature experienced during the deposition of welding passes.

Although the ER2594 and ER2209 are recommended to weld the 2507 superduplex stainless steel it is highly recommended to control the interpass temperature below. (800°C) during the deposition of welding passes. This will reduce the susceptibility of sigma phase formation and will assure the microstructural balance of ferrite and austenite to maintain the mechanical properties and corrosion resistance of the material.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their acknowledgement to TecNM/Instituto Tecnológico de Veracruz for the financial support.

REFERENCES

[1] Alhoud, A. R., Renton, N. C., y Deans, W. F. (2010). Hydrogen embrittlement of a super duplex stainless steel in acid solution. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(12), 6455-6464.

[2] Magnabosco, R., y Alonso-Falleiros, N. (2005). Pit Morphology and Its Relation to Microstructure of 850°C Aged Duplex Stainless Steel. *Corrosion* 61, 130-136.

[3] Chail, C.K. (2016). Super and hyper duplex stainless steels: structures, properties, and applications. *Structural Integrity Procedia* 1755-1762.

[4] Goshm, S.K y Mondal, S. (2008). High temperature ageing behavior of a duplex stainless steel. *Materials Characterization* 59 1776-1783.

[5] Nishimoto, K., Saida, K. y Katsuyama, O. (2006). Prediction of Sigma Phase Precipitation in Super Duplex Stainless Steel Weldments. *Weld World* 50, 13-28.

[6] Yutaka, S. Sato y Kokawa, Hiroyuki. (1999). Preferential precipitation site of sigma phase in duplex stainless steel weld metal, *Scripta Materialia*, Volume 40, Issue 6, 659-663.

[7] Magnabosco, R. (2009) Kinetics of sigma phase formation in a duplex stainless steel. *Materials Research* 12, 321-327.

[8] Kotecki, D.J. y Siewert, T.A. (1992). WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld

Metals: A Modification of the WRC-1988 Diagram. Welding Research Supplement, 171-178.

[9] Hemmer, H. y Grong, Ø. (1999). A process model for the heat-affected zone microstructure evolution in duplex stainless steel weldments: Part I. the model. *Metallurgical and Materials Transactions A* 30, 2915-2929.

[10] Davis, J.R. *ASM Specialty Handbook Stainless Steels*, ASM International, 1994.

[11] Lippold, J.C. y Kotecki, D.J. (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*, first ed., Wiley, New York.

[12] Hall, E.O. y Algie, S. H. (1966) The Sigma Phase, *Metallurgical Reviews* 11 (1), 61-88.

[13] Villanueva, D., Junior, F., Lesley, R. y Padilha, A. (2006). Comparative study on sigma phase precipitation of three types of stainless steels: Austenitic, superferritic and duplex. *Materials Science and Technology* 22, 1098-1104.

[14] Hosseini, V.A., Karlsson, L., Wessman, S. y Fuertes, N. (2018). Effect of Sigma Phase Morphology on the Degradation of Properties in a Super Duplex Stainless Steel. *Materials* 11, 933.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Sistema híbrido para detección oportuna de incendios en vehículos automotrices



Colaboración

Arturo Paniagua Balcázar; Esaú Muñoz Ordóñez; Joseph Christopher Zuart Morales; Emmanuel Yoc Solís, Universidad Politécnica de Tapachula

Fecha de recepción: 11 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 27 de noviembre de 2024

RESUMEN: En este trabajo se presenta un sistema híbrido para detección oportuna de incendios; el cual extingue fuegos dentro del compartimiento de un motor. Aquí se diseña un sistema híbrido para apagar el incendio en un vehículo automotriz, ya sea eléctrico o de combustión interna, para su accionamiento se activa el extintor con el compuesto de fosfato monoamónico esparciendo sobre todo el área de la cabina de motor sofocando el fuego.

Se enfatizó un sistema de alarma de manera visual y auditiva, la activación del sistema es de forma automatizada, además de un sistema manual que permite un control del apagado del conato de fuego. El accionamiento oportuno de este sistema favorece en la salvaguardar la integridad de los automovilistas y evitar daños mayores en el automóvil.

PALABRAS CLAVE: Seguridad, anti-fuego, automatizado, incendio, protección.

ABSTRACT: In this project a hybrid fire prevention system is presented, which extinguishes fires inside the engine bay. A hybrid prevention is designed to extinguish fires in automotive vehicles, whether it's internal combustion or electric, in order to action the system a monoammonium phosphate extinguisher spreads inside the engine bay suffocating the fire.

A visual and auditive alarm is emphasized, the systems activation is automated and also the presence of a manual system that helps to put out fires. The opportune activation of this system safeguards the integrity of drivers and reduces major damages to the vehicle

KEYWORDS: Security, anti-fire, automated, fire, protection.

INTRODUCCIÓN

Las estadísticas de incendios en vehículos son causas de atención basada en el hecho de que se han reportado una gran cantidad de incendios en vehículos sobre la carretera. Se estima un total de 212,500 incendios vehiculares donde resultaron 560 fallecimientos de personas civiles, un total de 1,500 personas civiles heridas y 1.9 billones de dólares en daños de propiedad directa en los Estados Unidos en el 2018. Indicando un gran efecto por causa de los incendios en vehículos. [1] De la totalidad de datos recaudados en los años, el 59% de los fuegos en vehículos diésel fueron causados por fallas mecánicas y un 23% por fallas eléctricas, indicando un alto porcentaje de fuegos en áreas relacionadas con las estadísticas.

El tiempo que tarda para que se engolfe completamente la cabina de un automóvil es de 10 minutos siempre y cuando el incendio empiece en el compartimiento del motor. [2]

Debido a los casos de incendios hay investigaciones tecnológicas en donde a la creación de prototipos similares al de este proyecto así el caso como el reporte Kiruthika (2023) [3] que establece un sistema contra incendios utilizando un microcontrolador, sensores de fuego, temperatura y fuego, un módulo wifi, una válvula eléctrica, el extintor, y sistema de bloque y un indicador. El propósito es identificar un fuego y extinguir antes que se desarrolle por medio de la detección automatizada del sistema. Así mismo indicar al conductor por medio de un indicador auditivo y notificar a una estación de bomberos cercana.

Los incendios dentro de una cabina de motor no son predecibles y pueden suceder en cualquier instancia, la respuesta a esta situación es la implementación de un sistema híbrido para detección oportuna de incendios que permita activarlo de forma manual cuando el sistema automático no detecte el incendio además de tener un coste económico en sus componentes, el cual por medio de la detección de elementos indicadores de fuego activado el sistema para sofocar el incendio [4]

Los incendios tienen una posibilidad de suceder dado debido a distintas causas dentro del compartimiento del motor. [5] El sistema busca inhibir la existencia de fuegos en el momento que lleguen a presentarse y como resultado disminuir la cantidad de incendios en vehículos automotrices.

Actualmente existe en el mercado sistemas a base de aerosol de 100 gramos como los que oferta la empresa AWARE, específicamente su modelo 100TH [6] instalado mediante soportes y tornillos, la deficiencia encontrada es su capacidad y el control, ya que no da a conocer como diferenciar un incendio del automóvil con un sobrecalentamiento del motor.

Problema de investigación

La idea nace de una problemática en donde se observó que los motores de autobuses locales se incendiaban en varias ocasiones. Esto ponía en riesgo a conductores y peatones, ya que se incendiaban en áreas céntricas con alto flujo de personas. Para combatir este tipo de incendios se realiza un sistema híbrido para apagar el incendio en un vehículo automotriz.

METODOLOGÍA

Este dispositivo se acciona mediante la detección de 2 variables las cuales tiene que existir para ac-

cionarse, las cuales son la temperatura y la detección de partículas.

En el siguiente diagrama se visualiza el control del sistema.

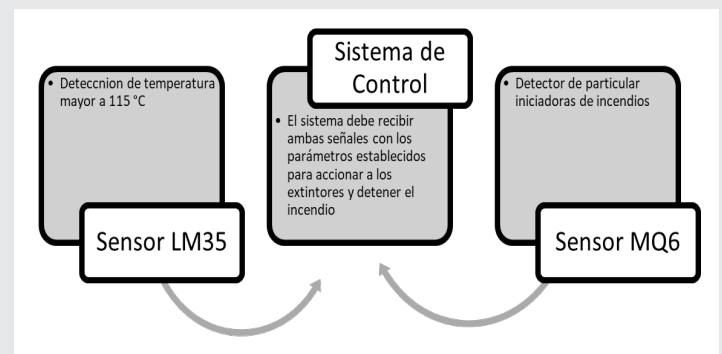


Diagrama de control.

Fuente: Elaboración propia.

MATERIAL Y MÉTODOS

Este prototipo se llevó a cabo en la Universidad Politécnica de Tapachula. Para iniciar el proceso de prototipado implementó el diseño en software CAD (Figura 1), esto con la finalidad de agudizar las ideas y observar los detalles constructivos a tener en consideración, una vez validado el diseño se pasó a la etapa constructiva.



Figura 1. Diseño de prototipo en Software CAD.

Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción de prototipo se utilizaron los materiales mencionados en la Tabla 1.

En un inicio se realizaron los cortes de la estructura rectangular a base de tubería PVC. Se continuó con la unión e interconexión de mangueras hacia los extintores, Se armó el mecanismo análogo y se conectó al extintor. Posteriormente se realizaron perforaciones en la estructura de tal manera que rea-

lizaban un cruce diagonal cubriendo el área dentro de la estructura.

Tabla 1. Lista de materiales .

Material	Unidad	Cantidad
Tubo PVC	Metro	10
Codo PVC	Pieza	08
Arduino UNO	Pieza	01
Sensor MQ6	Pieza	01
Sensor LM35	Pieza	01
Protoboard	Pieza	01
Manguera	Metro	1.2
Extintore (Fosfato Monoamónico)	Pieza	02
Palanca	Pieza	01
Cable de Palanca	Metro	0.5
Conector para manguera	Pieza	02
Recubrimiento	Metro	04
Cinchos de plástico	Pieza	25
Cable conductor	Metro	01

Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar el proceso de construcción se realizaron las conexiones del Arduino con sus componentes y una Protoboard al centro del armazón superior para monitorear el área. Se conectó este sistema con una alimentación de 12 VCD para conectar el motor que se conecta sobre el extintor y permite accionar el sistema. Se realizó una cubierta alrededor como un material protector en el momento que se realicen pruebas. Se realizó la programación de la tarjeta de programación tipo Arduino con su respectivo diagrama de conexión (Figura 2).

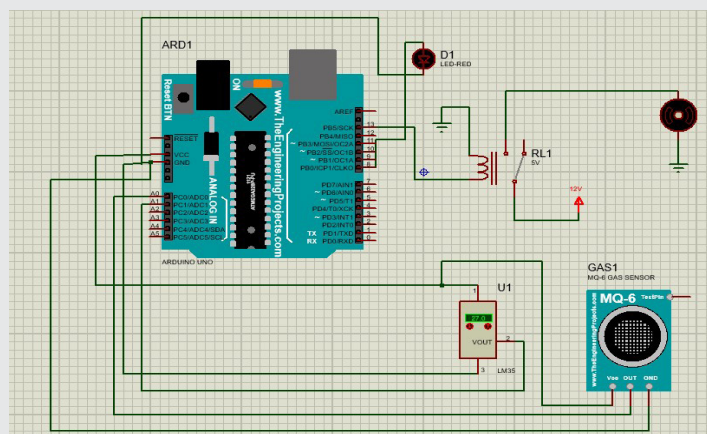


Figura 2. Diagrama de conexión.

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron cinchos plásticos para colocar el sistema de control y dejar fijo cada componente en su lugar.

Para la implementación del sistema automatizado es necesario la aplicación de la programación con el uso de un Arduino UNO y los sensores LM35 y MQ6 al igual que la implementación de los actuadores necesarios en el sistema. Esta programación se considera como funcional con momentos en donde el sistema cuesta de responder apropiadamente. Este ocupa el uso del sensor LM35 y MQ6 lo cuales van a monitorear los factores como el gas, humo y temperatura dentro del área. En la programación se declaran los sensores como entradas y las salidas como aquellas que conducen voltaje a un indicador y un relevador el cual es responsable de accionar el motor del sistema. Ocupando los valores necesarios para realizar la conversión de la señal análoga y convertirla a un voltaje comprensible, de esta forma, el Arduino capta las señales y por medio de las condicionales (IF, AND) va a determinar si se habilitan las señales de salida que activan el sistema, así mismo el monitoreo del sistema se va a visualizar dado que se imprimen los valores de los sensores al igual que indicadores del estado del gas-humo y de la activación del relevador.



Figura 3. Prototipo de Sistema Híbrido para Detección Oportuna de Incendios en Vehículos Automotrices.

Fuente: Elaboración propia.

El prototipo se construyó en su totalidad como se aprecia en Figura 3. Se realizaron las pruebas piloto para activar el extintor y posteriormente sofocar el fuego presente. Se tomó en cuenta que existen unos segundos de retraso para que el sistema interprete las señales y accione el sistema debido a la construcción de la programación, pero ese retardo entra dentro de un margen aceptable para su accionamiento. Posteriormente se realizaron las pruebas piloto del sistema manual, el cual era sumamente fácil de activar y accionar (Figura 4).



Figura 4. Pruebas de funcionalidad realizadas en prototipo.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Ambos sistemas trabajaron de manera indicada para extinguir un incendio de manera correcta, de manera eficaz y de la manera más rápida posible. El sistema manual por lo tanto accionó de manera adecuada y asegura, su funcionalidad parte del sistema de prevención de incendios primario y así mismo como sistema secundario.

En la Tabla 2 se pueden observar los resultados de las pruebas piloto realizadas.

Tabla 2. Resultados de pruebas realizadas

No. De prueba.	Temperatura(°C) censada dentro de la cámara de pruebas	Accionamiento del sistema
1	85	No
2	87	No
3	90	No
4	95	No
5	98	No
6	100	No
7	105	No
9	110	No
10	116	Si

Fuente: Elaboración propia.

El sensor de temperatura trabaja en conjunto con el de partículas, el sensor manda la señal pasando los 115 °C, pero no se activa si el de partículas no detecta lo deseado, esto para no confundir el tipo de incendios externos como forestales, humo de la

carretera o cualquiera que se pueda presentar en el camino.

El radio de alcance que generan los extintores accionados de manera simultánea es ideal para sofocar incendios en cualquier tipo de motor automotriz.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos podemos expresar que se desarrolló un sistema versátil y fácil de construir gracias a que los elementos que se integran dentro de él son de bajo costo y accesibles, permitiendo la construcción del prototipo sin necesidad de invertir una gran cantidad de capital.

La respuesta ante el conato de incendio es rápida y acorde los parámetros establecidos.

Este prototipo puede servir como una respuesta factible considerando su precio, efectividad y disponibilidad al público.

Se busca continuar con la mejora continua de este sistema para su implementación en diferentes vehículos.

AGRADECIMIENTOS

A nuestras autoridades de la Universidad Politécnica de Tapachula por su anuencia en este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ahrens, M., *Vehicle Fires*, Nfpa.org. Recuperado el 24 de octubre de 2023, de <https://www.nfpa.org/%5C/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/US-Fire-Problem/osvehiclefires.pdf>
- [2] Xiao-hui Jiang, Guo-qing Zhu, Hui Zhu, Dayan Li, 2018, *Full-scale Experimental Study of Fire Spread Behavior of Cars*, *Procedia Engineering*, Volume 211, recuperado el 23 de octubre de <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.016>.
- [3] Kiruthika, Sakthi, Manoj, Vishwash, I., H. D., Vijaykumar, & Parkunam. (2023). *Automatic fire extinguisher system with safety features for vehicles*. *E3S web of conferences*, 399, 05001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339905001>.
- [4] /Esmail-Mirmahdi. *Researchgate.net*. Recuperado el 16 de octubre de 2023, de https://www.researchgate.net/profile/Esmail-Mirmahdi/publication/353714198_Experimental_Results_for_Designing_and_Building_a_New_Intelligent_System_for_Fire_Alarm_and_Extinguishing_in_Automotives/links/610_bdd0f1e95fe241aafbca0/Experimental-Results-for-Designing-and-Building-a-New-Intelligent-System-for-Fire-Alarm-and-Extinguishing-in-Automotives.pdf.

[5] Yuri Lazarev, Albert Bashkarev, Olga Makovetskaya-Abramova and Shihseid Amirseyidov. Study of technical reasons for fire-burning vehicles. E3s-conferences.org. Recuperado el 25 de octubre de 2023, de https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/26/e3sconf_uesf2023_05053/e3sconf_uesf2.

[6] Sistema automático de extinción de incendios para vehículos Recuperado el 06 de diciembre de 2024, de <https://www.aware-fire.com>.





Bioquímica *y* Biológicos

Ingeniantes

Analisis de generación y composición de los Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Motul, Yucatán

RESUMEN: Los cambios en los hábitos de consumo, los avances tecnológicos y el aumento de la población, han ocasionado incremento en la generación de los residuos sólidos urbanos (RSU). La disposición a cielo abierto o en rellenos sanitarios de los RSU pueden causar efectos adversos al ambiente y salud de la población; además, las emisiones de gases de bióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) originado por la descomposición de la materia orgánica incrementan el efecto de invernadero y calentamiento global. El propósito de este trabajo fue identificar las zonas en donde existe una mayor generación de RSU y los diferentes elementos que lo componen; para alcanzar los resultados se realizaron muestreos al azar; en la determinación del tamaño de las muestras se tomó como universo las casas habitación que se encuentran en la ciudad de Motul. Se encontró que el plástico y el papel integran la mayor proporción de los residuos sólidos; el 50% de los encuestados genera de 1- 2 kg y el 36% de 3 - 4 kg. La materia orgánica que componen los RSU es de 48% y la cantidad residuos que se generan por habitante es de 0.7 kg/hab/día. Hay una proporción (más del 50%) de la población que está insatisfecha con el servicio de recolección de residuos; por consiguiente, el servicio debe ser más eficiente y en horarios establecidos para facilitar la recolecta de los desechos; además, los resultados obtenidos se utilizaran para proponer proyectos y profundizar más el área de estudio.

PALABRAS CLAVE: habitantes, residuos sólidos, materia orgánica, generación, relleno sanitario



Colaboración

Fernando Canul Bacab; José Antonio Alonzo Pacheco; Pedro Ezequiel May Hoil; Claudia Guadalupe Dzib Pool, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Motul

Fecha de recepción: 04 de mayo de 2024

Fecha de aceptación: 10 de diciembre de 2024

ABSTRACT. With the increase in population, the generation of solid waste (RSU) has increased, becoming an important issue for developing countries caused by changes in living standards and technological advances. Poor disposal of RSU causes adverse effects on the environment and the health of the population, especially when disposed of in open air or near populated areas; In addition, the emissions of carbon dioxide and methane gases caused by the decomposition of organic matter increase the greenhouse effect and global warming. To achieve results, the sources of generation were identified. A survey was applied taking as universe the households located in the city of Motul. From the results obtained, it was found that plastic and paper make up the largest proportion of solid waste. 50% of those surveyed generate 1-2 kg, 36% generate 3-4 kg, the organic matter that makes up RSU is 48%, and the amount of waste generated per capita is 0.7 kg/capita/day. There is a proportion (more than 50%) of the population that is dissatisfied with the waste collection service; therefore, the collection service must be more efficient and at established times to facilitate the collection of waste; in addition, the results obtained can be used to propose projects and further deepen the study area.

KEYWORDS: inhabitants, solid waste, organic matter, generation, landfill.

INTRODUCCIÓN

La mala disposición de los RSU causa efectos adversos al ambiente y la salud de la población, sobre todo cuando se disponen a cielo abierto o en rellenos sanitarios cercanas en zonas pobladas [1]; además, el CH₄ y el CO₂ generado por la descomposición de la materia orgánica contribuye al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero y al calentamiento global [2]; además, en un futuro cercano, la disposición final de los RSU en rellenos sanitarios podría no ser un método efectivo debido el incremento en la generación y la escasez de terreno; las prácticas de reducción y reciclaje de los RSU son elementos

importantes en las estrategias de la gestión de forma global [3]; por tal motivo, deben ir acompañadas de programas de concientización a los ciudadanos para fomentar la reducción y el reciclaje; por consiguiente, es necesario promover el consumo responsable por parte de la población para disminuir su generación. El conocimiento de la composición de los RSU es fundamental para planificar estrategias para el manejo; sin embargo, es complejo obtener datos confiables y consistentes, es común encontrar reportes oficiales de la composición y generación de RSU [4]; sin embargo, es difícil determinar qué tan precisos son estos datos que proceden de promedios nacionales e incluyen áreas rurales, urbanas y distintos estratos socio económicos.

En México, el manejo de los RSU se ha enfocado a la recolección y disposición final en tiraderos a cielo abierto y rellenos sanitarios, con diferencias en capacidad técnica y financiera, entre municipios y Estados; hay 95 rellenos sanitarios en el país; de estos, sólo 13 cumplen parcialmente la norma ambiental [5]. Diversos especialistas han mencionado que se debe de acabar con estos métodos de disposición final (tiraderos a cielo abierto y rellenos sanitarios), no solo por sus altos costos de operación sino porque causan daño permanente e irreversible a los suelos; por lo tanto, es importante que las autoridades analicen y comprendan la relación entre las medidas de las políticas públicas y el comportamiento en las prácticas de reciclaje [6].

En el entorno de recolección y transporte de los RSU influyen variables como son la separación, selección de los elementos reutilizables y la parte biodegradable; al respecto, las autoridades municipales deben desarrollar programas efectivos de recolección para la eliminación eficaz; todo esto con la finalidad de reducir los costos altos ocasionado por el consumo de combustible durante el transporte y colecta; por lo tanto, existe oportunidad de mejorar este aspecto y hacerlo rentable; en México el transporte de los RSU operan bajo el esquema básico de retiro de residuos [7]; es decir, recolectarlos y transportarlos al sitio de disposición sin ningún tratamiento previo.

La separación de los elementos que integran los RSU consiste en seleccionar materiales valiosos (cartón, papel, plástico, aluminio); por tal motivo, la recolección y transferencia de RSU debe realizarse con la frecuencia determinada para evitar la acumulación de desechos, minimizando los riesgos para el ambiente y la salud pública; además, debe de utilizarse vehículos diseñados para esa actividad, elegidos de acuerdo a la cantidad y tipo de elementos que componen los RSU [8].

El proceso de recolección y transporte ineficientes de RSU afectan a las empresas de gestión al incrementar los costos operativos y reduce sus ganancias [9]; por tal motivo, la optimización de costos es esencial para lograr una gestión sostenible de los desechos sólidos

en las economías en desarrollo; por consiguiente, es necesario que la recolección de RSU sea eficiente y eficaz mediante el análisis del sistema y optimización de las operaciones; aunado a esto, existe carencia de infraestructura para la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los RSU, así como la correcta planeación y manejo de los RSU; además, los recursos financieros insuficientes, la falta de experiencia técnica y la actitud pública han hecho que la situación sea desesperante debido a que los problemas relacionados con el ambiente y la salud están aumentando, [10].

Ante este contexto, es necesario determinar y conocer las características de los diferentes elementos que componen los RSU con la finalidad de plantear estrategias que apoyen la gestión y la toma de decisiones; además, involucrar a las empresas interesadas en el proceso de recolección de RSU; por lo anterior, el interés debe de centrarse y desarrollar herramientas que vinculen aspectos económicos y ambientales en los diferentes procesos, como son el transporte, el reciclado, la reutilización y la disposición final de los diferentes componentes que integran los RSU; por tal motivo, la finalidad de este trabajo es realizar un diagnóstico de la generación de RSU, identificando los elementos que lo integran, áreas de mayor generación y el número de recorridos necesarios; además, generar información que sirva de apoyo a la gestión y toma de decisiones a las personas involucradas.

MATERIALES Y METODOS

Selección del área de estudio

Este trabajo se realizó en la ciudad de Motul, Yucatán, México; se encuentra ubicada en la parte centro-norte del Estado de Yucatán Figura 1, siendo la agricultura la principal actividad económica; además, se encuentran empresas y microempresas como son tiendas de abarrotes, talleres de costura, hoteles y unidades de servicio.



Figura. 1. Mapa de la ciudad de Motul.
Fuente. www.google.com.

La ciudad de Motul no cuenta con un programa de recolección de residuos; por consiguiente, las empresas que prestan este servicio no cubren la totalidad de las casas habitación; los RSU son recolectados y desechados sin ningún tipo de clasificación de sus componentes, además, la información de la problemática de los RSU que se tiene es escasa. Se desconoce la cantidad porcentual de los elementos que integran los residuos que generan; por lo tanto, no se sabe su verdadero valor económico, así como el destino final que deben de tener; además, se ha observado que existen habitantes que aun queman los RSU en sus patios y en ocasiones son llevados a la orilla de la carretera propiciando la creación de basureros clandestinos, lo que representa un peligro potencial para la salud de las personas.

Para la recolección de la información se diseñó una encuesta (no mostrado) y fue aplicado a los habitantes de las casas habitación; se señala que, previamente a la aplicación de la encuesta fue valorada aplicándola a 40 viviendas como prueba piloto, se realizó con la finalidad de verificar la comprensión de las preguntas a aplicar; además, se obtuvo información que sirvió para alcanzar las metas planteadas.

Determinación del tamaño de muestra

Los RSU son materiales heterogéneos, sus tasas de generación y composición varían de lugar y de un periodo estacional a otro [11]; para estimar con mayor precisión las cantidades generadas fue necesario llevar a cabo un muestreo.

Para realizar el estudio, fue necesario estimar la cantidad el total de viviendas de la ciudad de Motul, el conteo de viviendas se realizó con la ayuda del google maps y fueron numeradas para su identificación. Los criterios para determinar el número de elementos de la muestra se basaron en el análisis de las características de la población y densidad de las viviendas en las diferentes zonas establecidas; además, no se consideró niveles socioeconómicos. Para la determinación del tamaño de muestra se tomó como referencia a Salgado-López-[12], y se utilizó la ecuación 1.

$$n = \frac{NZ^2_{\alpha/2}pq}{Nd^2 + Z^2_{\alpha/2}pq} \quad \text{Ec (1)}$$

Esta ecuación corresponde al modelo de muestreo simple aleatorio donde;

N = Tamaño de la población

n = Tamaño de la muestra

p = Probabilidad de éxito

q = Probabilidad de fracaso

Z = Cuartil $\alpha/2$ de la distribución normal estándar con 95 % de confiabilidad.

Los valores de q y p fueron tomados de una encuesta aplicada a un sector de la ciudad de Motul obteniéndose los siguiente (Tabla 1): se utilizó un porcentaje de confiabilidad (Z) de 95%, valores de q de 0.28 el cual

representó la probabilidad de viviendas en la que no se recoge los residuos y p de 0.72 representó la probabilidad de viviendas en la que se recogen los residuos.

Tabla 1. Resultados de la encuesta proporcionada por el H. Ayuntamiento de la ciudad de Motul,

Descripción	Porcentaje
Casas habitación que utilizan el sistema de transporte de basura.	72
Casas habitación que no utilizan el sistema de transporte de basura.	28
Total	100

Selección de los puntos de muestreo

Para facilitar el muestreo y por las características de la distribución de la población, la ciudad de Motul fue dividida en 4 zonas (Figura 2)



Figura 2. Mapa de la ciudad de Motul, con las zonas numeradas.

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de los elementos de la muestra se tomó como referencia a Addo, et al.-[13], para el cálculo del número de viviendas requerido de cada zona, se aplicó el procedimiento de muestreo aleatorio simple y la ecuación 1; este procedimiento se realizó al azar.

Recolección de los residuos

Para la realización del muestreo se tomó como referencia la normas mexicana[14]. Las casas habitación seleccionadas para el trabajo fueron visitadas previamente; además, se les invitó a participar en la investigación; a estas viviendas se les proporcionó bolsas de nylon para el almacenaje de los RSU.

La toma de muestras se realizó en cada vivienda seleccionada determinando la cantidad de RSU y el número de habitantes que viven en ese hogar.

Cuantificación de los RSU

La determinación de la cantidad de los RSU y el número de muestreos se realizó tomando como referencia la norma NMX-AA-61-1985 [15]; sin embargo, debido a la cantidad de residuos que se recogió no se requirió de la realización del cuarteo tal como lo indica la norma NMX-AA-15-1985 [14]. Para el pesado de las bolsas con RSU se utilizó una balanza granataria marca Ohaus con una sensibilidad de 0.1 g a 10 kg y para el cálculo de la generación de los RSU por habitantes se utilizó la ecuación 2:

Una vez registrado el peso de los RSU de cada vivienda, el resultado se obtuvo al dividir el peso total de los residuos entre el número de habitantes de la vivienda y se expresó en kg/hab/día, ecuación 2.

$$\text{Generación de RSU} = \frac{\text{Kg de RSU por vivienda}}{\text{Número de habitante por vivienda}} \quad \text{Ec (2)}$$

Después de pesar cada bolsa, se determinó la composición de los elementos que lo integran; finalmente se obtuvo el porcentaje de cada uno mediante la aplicación de la ecuación 3 [16]:

$$PS = \frac{W1}{W} \times 100 \quad \text{Ec (3)}$$

En donde:

PS = Porcentaje del subproducto considerado.

W1 = Peso del subproducto considerado en kg; descontando el peso de la bolsa empleada.

W = Peso total de la muestra recolectada en kg.

Determinación del número de vueltas

Para la determinación de la cantidad de residuos a recolectar se utilizó la ecuación 4, para facilitar los recorridos y por la cantidad de RSU que se estimó que generarían se consideró una frecuencia de recolección de una vez cada 7 días; por consiguiente, para el cálculo se utilizó la ecuación 4:

$$W = P \times PPC \times D \quad \text{Ec (4)}$$

Donde:

W= Es el peso total de los residuos.

P= Cantidad de habitantes a atender.

PPC= Generación de residuos.

D= Número de días a recolectar,

Para estimar el número de recorrido del vehículo se utilizó la ecuación 5, debido a las características de los elementos que integran los RSU se determinó utilizar un vehículo compactador de 8 toneladas; por lo tanto, tenemos:

$$Nr = \frac{W}{CV} \quad \text{Ec (5)}$$

Donde.

Nr= Número de recorridos.

W= Peso total de los residuos en toneladas.

CV= Capacidad del vehículo en toneladas.

Análisis estadístico

Los resultados fueron analizados con los programas estadísticos Excel.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Determinación de los elementos de cada zona

En la Tabla 2, se observa la cantidad de viviendas seleccionadas en cada zona, encontrando la mayor densidad de viviendas en la zona 3 y 4.

Tabla 2. Número de viviendas seleccionadas por zona.

Zona	Número de casas
1	62
2	81
3	99
4	68

En la Figura 3, se observa que el 50% de las viviendas generan una cantidad promedio de 1 a 2 kg por día, el 36% de 3 a 4 kg; además, el 15% de la población generan cantidades mayores de residuos de 5 kg por día; por lo tanto, la cantidad promedio de RSU que se determinó fue de 0.7 kg/hab/día. Si consideramos que el municipio de Motul tiene un total de 37804 [17], se estaría generando 26.46 Tm/día de RSU; es importante señalar que, no todos los habitantes entregan sus residuos al camión recolector, por lo que se desconocen el destino que le dan Figura. 3.

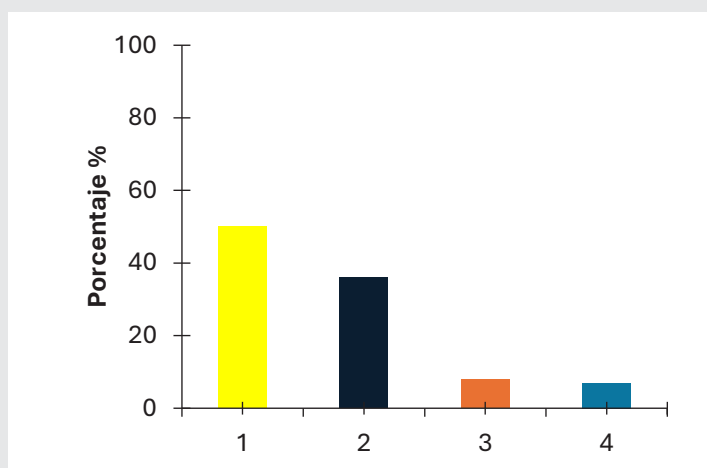


Figura 3. Cantidad de RSU que generan en las viviendas por día. 1, 1-2 kg; 2, 3-4 kg; 3, 5-6 kg; 4, 7-10 kg

Kaza, et al.-[18], menciona que a nivel global, se genera 0.74 kg/hab/día, sin embargo, las tasas nacionales de generación de desechos fluctúan ampliamente de 0.11 a 4.54 kg/hab/día; además describen que los volúmenes de generación de RSU están correlacionados con los niveles de ingresos y las tasas de urbanización; por otra parte, Espinoza, et al.-[19] describen que el rango de generación de RSU es de 0.49 a 2.08 kg/hab/

día, encontrando las mayores tasas de geración en los países mas desarrollados; además, las tasas de generación calculada guardan relación directa con indicadores de actividad, tamaño poblacional y desarrollo de los países; por tal motivo, a medida que la población se incrementa y sus habitantes utilizan productos recientes, las ciudades se vuelven más prósperas; además, participan en el comercio y el intercambio mundial de productos; por consiguiente, ofrecen más productos y servicios a los ciudadanos; por lo tanto, se enfrentan a mayores cantidades de RSU que deben gestionar mediante el tratamiento y la eliminación [7], en la región de estudio la cantidad que generan se encuentran dentro de la media (0.74 kg/hab/día), a pesar de estos resultados, es necesario crear programas de manejo de residuos para el desarrollo de una cultura ambiental.

En la Figura 4 se observa que los RSU está integrado en proporción elemental de 48% de plásticos, 34% de papel y 12% de material orgánica; además, en una menor proporción se encuentran los vidrios, baterías y otros materiales.

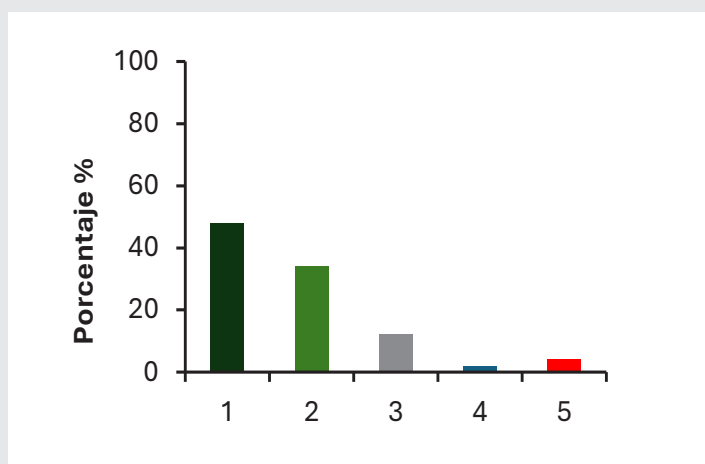


Figura 4. Elementos que integran los RSU.

1 Plástico; 2 Papel y cartón; 3 Materia orgánica; 4 Metales; 5 otros

El hecho de encontrar estos tipos de materiales dentro de los RSU, da una idea de la tendencia de los productos que consume los habitantes de las poblaciones al preferir producto con empaques no retornables, se ha encontrado en las bibliografías que las características y propiedades de los RSU están influenciado por contextos regionales, estacionales y socioeconómicos; por lo tanto, la variación de los desechos se atribuye a diferentes estilos de vida culturales y sistemas de gestión. Los análisis de los resultados de los lugares de generación proporcionan una mejor comprensión de la información de las características de residuos particulares, son necesarios para proponer programas de recuperación de energía y el reciclaje de los componentes que lo integra.

Con base a los resultados se observa que la tendencia del consumo de los habitantes es de adquirir productos

con empaques desechables; por lo tanto, es necesario plantear propuesta de proyectos enfocados al reciclado de este tipo de desechos.

Como puede observarse en la figura 5, de los diferentes tipos de plástico que generan los habitantes, la mayor cantidad corresponde a empaques de bebidas carbonatadas, siendo de un 54%; sin embargo, no se está considerando el porcentaje de envases utilizados para el embotellado de agua purificada; por consiguiente, sería de un 62%; además, este tipo de empaque pueden ser reutilizadas o reprocesadas como materia prima para la generación de otros productos; por lo tanto, disminuirá la carga de contaminante que son desechados; por consiguiente, es importante buscar materiales alternativos con propiedades similares pero que sean amigables con el ambiente, por otro lado, existen evidencias que sugieren que el reciclado del PET pueden ser menos dañinos para el próximo mundo verde. Varias tecnologías novedosas están progresando para hacer plásticos degradables como plásticos fotodegradables; sin embargo, los científicos buscan un mejor sustituto para resolver este problema y crear una sustancia degradable o controlar la vida útil.

Siddiqui, et al.-[20], mencionan que los envases utilizados en las bebidas carbonadas que están hechos a partir de polietileno tereftalato (PET) son utilizados en mayor volumen, principalmente en botellas para agua o bebidas carbonatadas; además, el PET es ampliamente utilizado en aplicaciones de películas para bandejas y tapas de alimentos, además, se tiene una capacidad total de producción mundial de más de 65 millones de toneladas de polímero virgen al año. Con base a los resultados anteriores, se puede observar que la población prefiere este tipo de producto con empaques desechables, a pesar de que el costo es mayor; es importante recalcar que, este tipo de materiales tienen un periodo de degradación muy alto; por lo tanto, es muy importante desarrollar tecnología para su reprocesamiento (Figura 5).

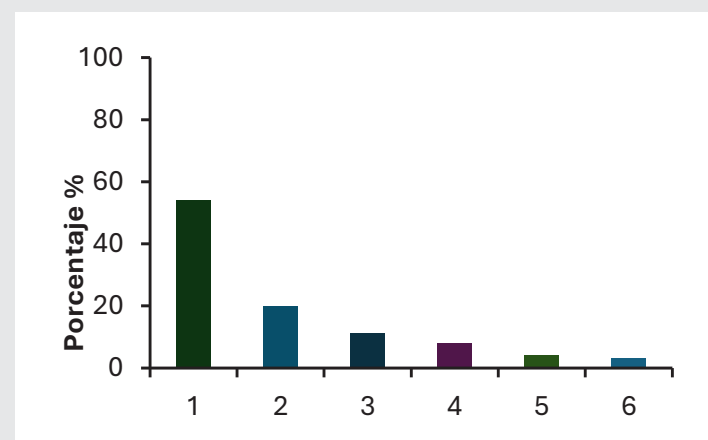


Figura 5. Tipos de envases que integran los RSU.

1, Bebidas carbonatadas; 2, Detergentes; 3, ácido muriático; 4, agua purificada; 5, Herbicidas; 6, otros.

La materia orgánica contenida en los RSU es la parte biodegradable que es susceptible de ser aprovechable para la recuperación de energía, el porcentaje en masa determinado fue del 48%, en la figura 6, se observa los elementos que integran la materia orgánica, el 31% estaba integrada por residuos de alimentos, el 8% estaba formada por residuos de fibras vegetales como residuos de jardín y partes de madera; además, el 12% estaba integrado por tallos de diferentes especies de plantas y hojas de árboles ver Figura 6.

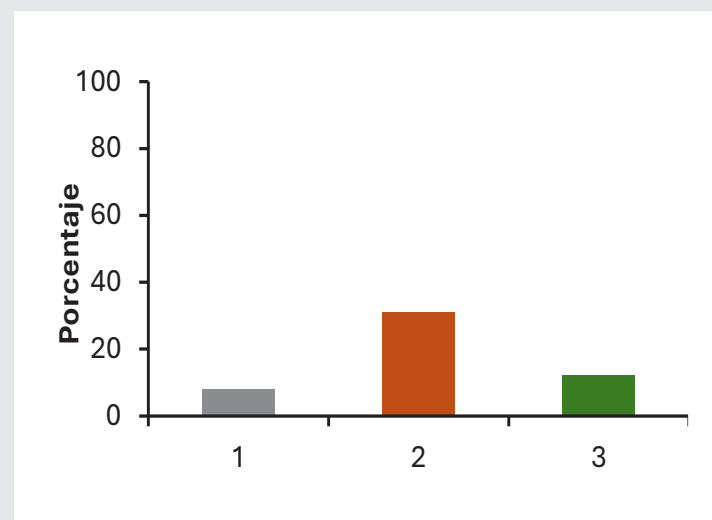


Figura 6. Elementos que integra la materia orgánica biodegradable en la RSU en masa

1, fibras vegetales; 2, residuos de alimento; 3, residuos de plantas

Chen, et al.-[21] mencionan que los residuos orgánicos representa una gran proporción de RSU, incluso se incrementan cuando las economías crecen; sin embargo, estiman que los residuos orgánicos varían del 47% en el 2015 al 39.8% en el año 2050 en relación con el porcentaje de todos los demás tipos de residuos, esto es debido a la saturación de residuos orgánicos ocasionado por el consumo de alimentos; además, mencionan que los residuos orgánicos seguirán siendo la parte más importante de RSU debido a sus características y como fuente para la obtención de otros bio-productos; de manera análoga, Sharma and Jain-[22] describen que la región y el nivel de ingresos económicos de la población influye en el contenido en masa de la materia orgánica en la RSU; además, señalan que dependiendo de sus ingresos pueden oscilar en un rango de 56 a 44%; asimismo, a medida que el mundo avanza hacia su futuro urbano; por lo tanto, el incremento de la tasa de generación de RSU es mayor que la tasa de urbanización.

Por otra parte, la materia orgánica contenida en la RSU de la zona de estudio, puede ser utilizada como materia prima para la obtención de bio-productos y biogás a través de la digestión anaeróbica; este proceso ha recibido una atención creciente en todo el mundo y se

ha convertido en una de las tecnologías más extendida en el campo del tratamiento. Valentino, et al.-[23], describen que la fracción orgánica de los RSU es utilizada como materia prima en el proceso de digestión anaerobia, las macromoléculas son convertidas a ácidos grasos volátiles; además, las reacciones catalíticas fueron controladas evitando la inhibición de las bacterias metanogénicas; por consiguiente, la fracción de desechos orgánicos utilizado para la producción de ácidos grasos volátiles también puede ser utilizados para la síntesis de otros bio-productos con alto valor en el mercado; por otro lado Tyagia, et al.-[24] describen que la materia orgánica de los RSU puede ser utilizado para la generación de hidrógeno bajo condiciones mesofílica; además, este elemento favorece la producción de metano; por lo tanto, lo consideran como una alternativa para la recuperación de bioenergía.

En la Figura 7, se observa la opinión de las personas referente a la problemática ambiental, el 31 % de las personas considera que el problema de la contaminación ambiental es ocasionada por falta de educación de los habitantes, el 25 % por ignorancia y en menor proporción por el alto consumo de productos desechable; sin embargo, es importante considerar que de acuerdo a la encuesta aplicada existe una alta cantidad de la población que desconocen las características de los componentes que integran los RSU; por lo tanto, una propuesta de proyecto sobre manejo y disposición final daría mayor conocimiento acerca de los diferentes componentes.

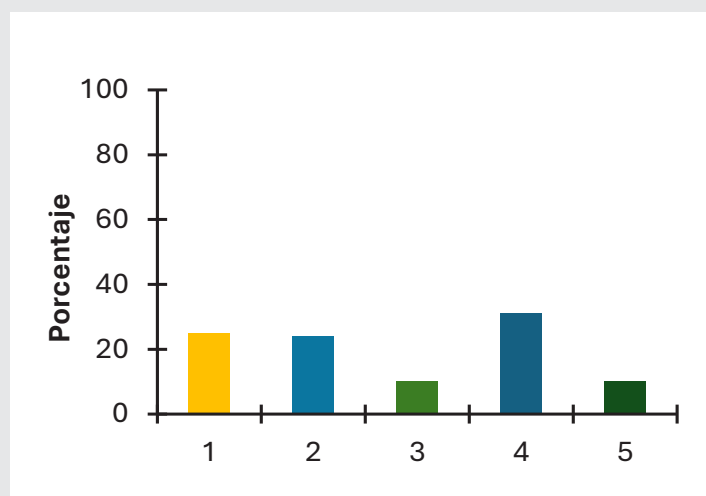


Figura 7. Causas del problema de la basura;

1, ignorancia; 2, flojera; 3, consumismo; 4, falta de educación; 5, empaques desechables

Esmaeilzadeh, et al.-[25], mencionan la importancia de los programas para la culturización y educación en el conocimiento de los RSU así como la poca importancia que le dan las organizaciones, oficinas, instituciones y autoridades responsables en la aplicación de las normas y reglamentos; además, la debilidad en la toma de decisiones ejecutivas, la falta de participación de ver-

daderos expertos en la materia, así como la falta de utilización de prácticas y experiencias exitosas en el manejo de residuos a nivel global ocasionan mal manejo de los RSU; también, describen que las investigaciones han demostrado que la participación de los ciudadanos es uno de los factores efectivos y necesarios en la disposición de los residuos; por otra parte, Nanda and Berruti-[26], describen que los programas de participación y sensibilización ciudadana puede mejorar la gestión de RSU; además, es necesario educar e informar a los ciudadanos sobre los principios de reducir, reutilizar, reciclar y recuperar (4R), de tal manera que los residentes se vuelva menos dependientes en la recolección de los RSU; así mismo, debe existir cooperación y consenso entre las autoridades; además, comunicación en la planificación y ejecución de los sistemas de gestión de los servicios municipales de residuos sólidos.

La gestión de los RSU se ha convertido en importante preocupación tanto regional como global debido a la creciente urbanización; por consiguiente, si no tiene un manejo y disposición eficiente la generación de desechos puede tener impactos adversos en la salud pública y el ambiente.

La recolección y transporte de residuos contribuye a mantener las condiciones de salud de los habitantes; por consiguiente, se evita la generación de vectores, malos olores, líquidos contaminantes, así como la materia orgánica en descomposición; por lo tanto, es necesario considerar la cantidad, frecuencia, área de recolección y tipo de residuo,

Para estimar la cantidad total de RSU generados en la zona de estudio, se consideró el número de habitantes [17], cantidad de residuos generados por habitantes en un día (0.7 kg/hab/día) y frecuencia de recolección (7 días); para determinar el número de recorridos del vehículo recolector en cada zona, el cálculo se realizó tomando como referencia un transporte compactador de 8 toneladas (Tabla 3).

En la Tabla 3; se observa que, en la zona 2 y 3 la cantidad de residuos generados son mayores comparados con la 1 y 4; por lo tanto, es donde se encuentra la mayor densidad de la población; por consiguiente, es donde se encuentra la mayor cantidad de residuos por día.

Tabla 3. Cantidad de residuos generados por zona

Zona	kg	Número de recorrido
1	37051	5
2	48160	6
3	59276	7
4	40754	5

CONCLUSIÓN

La gestión de RSU se ha convertido en uno de los problemas que requiere de la participación de expertos del

área de la gestión ambiental, se ha prestado poca atención para mitigar los efectos negativos de la mala disposición de los RSU; por consiguiente, continúa mostrando un fuerte potencial de crecimiento. Este trabajo da a conocer los elementos que forman parte de los RSU y muestra la situación en la que se encuentra el sistema de gestión del área de estudio. Los resultados muestran una tendencia hacia el incremento en la generación de los residuos; además, se encontró una mayor utilización de productos con empaques desechables por parte de los habitantes, siendo en mayor porcentaje los plásticos; sin embargo, en cuanto a la composición másica se observó en mayor proporción la materia orgánica, la cual es susceptible de ser utilizada como materia prima para la obtención de otros productos como son los biocombustibles; además, destacó el porcentaje de materiales no biodegradables como son los metales pero que puede ser reciclables para la obtención de otros productos; también se encontró envases de cartón multicapas para bebidas, lo que indica que deben encaminarse esfuerzos por analizar alternativas viables para la valorización de estos residuos.

No se encontró influencias significativas en la composición elemental, siendo similares en las 4 zonas. En cuanto a la generación de RSU se estimó que fue de 0.7 kg/hab/día, la cual es similar a la media nacional. Con base a lo anterior se determina que la recolección de los residuos debe ser más eficiente, y en horarios establecidos; además, se debe profundizar más el estudio de la problemática ambiental del área de estudio y su evolución en un futuro próximo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Banerjee, P., Hazra, A., Ghosh, P., Ganguly, A., Murmu, N. C., and Chatterjee, P. K. (2019) *Solid Waste Management in India: A Brief Review, Research Gate*. 25-40, 3
- [2] Fazeli, A., Bakhtvar, F., Jahanshaloo, L., Sidik, N. A. C., and Esfandyari, A. (2016) *Malaysia's stand on municipal solid waste conversion to energy: A review, Renew. Sust. Energ. Rev.* 1007-1016, 58
- [3] Cruz Sotelo, S. E. and Ojeda Benítez, S. (2013) *Gestión sostenible de los residuos sólidos urbanos, Rev. Int. de Contam. Ambient.* 7-8, 29
- [4] Hernández-Berriel, M. D. C. et al. (2016) *Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en américa latina y el caribe, Revista Internacional de. Contaminación Ambiental*. 11-22, 32
- [5] Vlichis, F. L., Tovar, L. A. R., Flores, M. T., and Sepúlveda, J. A. M. (2013) *La gestión de residuos sólidos en México, Research Gate*. 117-153.
- [6] Singh, A. (2019) *Managing the uncertainty problems of municipal solid waste disposal, J. Environ. Manage.* 259-265, 240.

- [7] Olay-Romero, E., Turcott-Cervantes, D. E., Hernández-Berriel, M. d. C., Cortázar, A. L.-G. d., Cuartas-Hernández, M., and Rosa-Gómez, I. d. I. (2020) Technical indicators to improve municipal solid waste management in developing countries: A case in Mexico, *Waste Manage.* 201-210, 107.
- [8] Gonçalves, A. T. T., Moraes, F. T. F., Marques, G. L., Lima, J. P., and Lima, R. d. S. (2018) Urban solid waste challenges in the BRICS countries: a systematic literature review, *Rev. Ambient. Água.*
- [9] Sulemana, A., Donkor, E. A., Forkuo, E. K., and Oduro-Kwarteng, S. (2018) Optimal Routing of Solid Waste Collection Trucks: A Review of Methods, *J. Eng.* 1-13.
- [10] Srivastava, V., Ismail, S. A., Singh, P., and Singh, R. P. (2014) Urban solid waste management in the developing world with emphasis on India: challenges and opportunities, *Environmental Science and Bio/Technology.* 1-22.
- [11] Pandey, B. K., Vyas, S., Pandey, M., and Gaur, A. (2016) Municipal solid waste to energy conversion methodology as physical, thermal, and biological methods, *Current Science Perspectives* 39-44, 2.
- [12] Salgado-López, J. A. (2012) Solid Waste: Perception and factors which facilitate its separation at home: The study case of two habitable units in Tlalpan, *QUIVERA.* 91-112.
- [13] Addo, I. B., Adei, D., and Acheampong, E. O. (2015) Solid Waste Management and Its Health Implications on the Dwellers of Kumasi Metropolis, Ghana, *Current Research Journal of Social Sciences.* 81-93, 3
- [14] DOF (1992) NMX-AA-15-1985 , *Protección Al Ambiente - Contaminación Del Suelo -Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método De Cuarteo,* 1-3,
- [15] DOF, "NMX-AA-61-1985 , *Proteccion Al Ambiente-Contaminacion Del Suelo-Residuos Solidos Municipales-Determinacion De La Generacion,*" 1992.
- [16] SEMARNAT, "Proteccion al ambiente-contaminacion del suelo residuos solidos municipales-seleccion y cuantificacion de subproductos (NMX-AA-022-1985)," in "DOF," 1985.
- [17] INEGI, "Censo Nacional de Viviendas 2020 " 2020, Available: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=31052#collapse-Resumen>.
- [18] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., and Woerden, F. V. (2018) What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050,
- [19] Espinoza, P. T., Arce, E. M., Daza, D., Faure, M. S., and Terraza, H. (2010) Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe 2010 OMS. 1-164,
- [20] Siddiqui, M. N., Redhwi, H. H., Al-Arfaj, A. A., and Achilias, D. S. (2021) Chemical Recycling of PET in the Presence of the Bio-Based Polymers, PLA, PHB and PEF: A Review, *Sustainability.* 1-26,
- [21] Chen, D. M.-C., Bodirsky, B. L., Krueger, T., Mishra, A., and Popp, A. (2020) The world's growing municipal solid waste: trends and impacts, *Environ. Res. Lett.* 1-13, 15
- [22] Sharma, K. D. and Jain, S. (2020) Municipal solid waste generation, composition, and management: the global scenario, *Soc. Responsib. J.* 1-33,
- [23] Valentino, F., Moretto, G., Gottardo, M., Pavan, P., Bolzonella, D., and Majone, M. (2019) Novel routes for urban bio-waste management: A combined acidic fermentation and anaerobic digestion process for platform chemicals and biogas production, *J. Clean. Prod.* 368-365, 2020
- [24] Tyagia, V. K., Fdez-Güelfoc, L. A., Zhoud, Y., Álvarez-Gallego, C. J., Garcia, L. I. R., and Nga, W. J. (2018) Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 380-399, 93.
- [25] Esmaeilzadeh, S., Shaghaghi, A., and Taghipour, H. (2020) Key informants' perspectives on the challenges of municipal solid waste management in Iran: a mixed method study, *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 1-15,
- [26] Nanda, S. and Berruti, F. (2020) Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review, *Environmental Chemistry Letters.* pages1433-1456, 19



Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Perspectivas estratégicas del Litio en México: potencial económico y desafíos industriales



Colaboración

M.L. Quemada-Villagómez; L.I. Quemada-Villagómez; H. Jiménez-Islas; J.J. Villegas-Saucillo, Tecnológico Nacional de México en Celaya; N.L. Flores-Martínez, Universidad Politécnica de Guanajuato

Fecha de recepción: 31 de junio de 2024

Fecha de aceptación: 27 de noviembre de 2024

RESUMEN: El panorama del litio en México genera creciente interés científico y económico debido al descubrimiento de importantes reservas, principalmente en Sonora y Baja California. Sin embargo, el país aún no se consolida como un productor destacado a nivel mundial, encontrándose en una fase inicial de extracción. Este mineral es clave para la transición energética, al ser esencial en la fabricación de baterías para vehículos eléctricos, los cuales son fundamentales en la reducción de emisiones de carbono.

México tiene el potencial de desarrollar la industria del litio mediante la producción de baterías, diversificando su economía y generando empleos. Además, incentivar la inversión y fomentar la investigación en tecnologías de extracción y procesamiento podría acelerar este desarrollo.

Gracias a sus reservas y su proximidad con Estados Unidos, un mercado estratégico para la electromovilidad, México tiene la oportunidad de convertirse en un productor global relevante. Para lograrlo, es crucial establecer un marco regulatorio robusto y políticas públicas que favorezcan la inversión, permitiendo al país posicionarse como un actor clave en el mercado internacional de baterías.

PALABRAS CLAVE: baterías, explotación, litio, vehículos eléctricos

ABSTRACT: The lithium landscape in Mexico is generating growing scientific and economic interest due to the discovery of significant reserves, mainly in Sonora and Baja California. However, the country has not yet established itself as a leading producer worldwide and is in the initial extraction phase. This mineral is key to the energy transition, as it is essential in the manufacture of batteries for electric vehicles, which are fundamental in reducing carbon emissions.

Mexico has the potential to develop the lithium industry through battery production, diversifying its economy and creating jobs. In addition, encouraging investment and promoting research in extraction and processing technologies could accelerate this development.

Thanks to its reserves and proximity to the United States, a strategic market for electromobility, Mexico has the opportunity to become a relevant global producer. To achieve this, it is crucial to establish a robust regulatory framework and public policies that favor investment, allowing the country to position itself as a key player in the international battery market.

KEYWORDS: batteries, electric vehicles, exploitation, lithium.

INTRODUCCIÓN

El litio es un elemento químico cuyo interés ha aumentado en los últimos años debido a su capacidad para almacenar energía en baterías, lo cual lo hace esencial para la tecnología moderna y la transición a fuentes de energía sostenibles. México es uno de los países más ricos en reservas de litio, con aproximadamente 3.7 millones de toneladas, por lo que su exploración y extracción pueden tener un impacto significativo en la economía, la sociedad y el medio ambiente. Sin embargo, la extracción de litio también conlleva desafíos importantes, como la degradación del suelo,

la alteración de ecosistemas naturales y la disminución de recursos hídricos. Además, este proceso puede generar costos económicos y sociales para las comunidades locales, tales como la disminución de la calidad de vida, la pérdida de tierras y recursos, así como problemas relacionados con la contaminación ambiental y la explotación laboral.

En este contexto, es fundamental considerar la sostenibilidad de la extracción de litio en México. Adicionalmente, se debe investigar el desarrollo de alternativas sostenibles al litio para su uso en baterías y promover la implementación de prácticas mineras responsables, que minimicen los impactos negativos en las comunidades y el medio ambiente. En este artículo, se analizarán en detalle los impactos económicos, ambientales y sociales de la extracción de litio en México, así como las alternativas tecnológicas sostenibles que podrían ser implementadas. También se explorarán las implicaciones y los desafíos asociados con la exploración y explotación de litio, proporcionando una visión integral de la situación actual y las oportunidades futuras.

Descripción química del litio

En su forma pura el litio es un metal blando, de color blanco plata, que se oxida rápidamente en presencia de aire o agua [1]. Es un elemento moderadamente abundante y está presente en la corteza terrestre en 65 partes por millón (ppm). El litio se encuentra presente en una amplia gama de minerales (aproximadamente 145 especies mineralógicas lo contienen), solamente algunas poseen valor económico [2]. En la Tabla 1 se muestran las propiedades físicas de este elemento.

También, el litio se encuentra en salmueras de diversos orígenes, como salmueras naturales, salmueras asociadas a pozos petrolíferos y a campos geotérmicos. Las salmueras con valor económico se encuentran básicamente en salares y lagos salinos. También se encuentra presente en diversas arcillas (siendo la hectorita la más importante) y en el agua de mar en concentraciones del orden de 0.17 ppm. La Tabla 2 muestra los compuestos de los que se puede extraer el litio y las concentraciones que contiene cada uno de ellos.

Tabla 1. Propiedades del Litio.

Número atómico	3	Adimensional
Peso atómico	6.941	Gramos por mol (g/mol)
Estructura	Monoclínico	Adimensional
Punto de fusión	186	Grados Celsius (°C)
Punto de ebullición	1.336	Grados Celsius (°C)
Peso específico	0.534	Gramos por centímetro cúbico (g/cm³)
Calor específico del estado líquido (sobre 200 °C)	1.0	Calorías por gramo por grado Celsius (cal/g · °C)
Calor específico	0.784	Calorías por gramo por grado Celsius (cal/g · °C)
Resistividad	8.55	0 °C: ohm por metro (Ω/m)
Coefficiente de temperatura de la resistividad	4.5 x 10 ⁻³	Grado Celsius (°C ⁻¹)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Compuestos de los que se extrae el litio.

Nombre	Fórmula	Porcentaje de litio
Esodunema	(Si ₂ O ₆)LiAl	8%
Ambigonita	PO ₄ LiAlF	10.1%
Lepidolita	(AlSi ₃ O ₁₀)K(Li, Al)(O, OH, F)	3.3% a 7%
Petalita	LiAl(Si ₄ O ₁₀)	--

Fuente: Elaboración propia.

Usos actuales y usos potenciales previsible a futuro

El litio tiene varios usos como la elaboración de diferentes tipos de baterías, vehículos, automotores, ferrocarriles, transporte aéreo, fabricación de toda clase de artefactos y una gran variedad de máquinas industriales, teléfonos celulares, armas, generadores de electricidad, acumuladores, con gran capacidad de almacenar energía e, incluso, se utiliza en las baterías de las naves para vuelos espaciales.

Otros usos del litio radican en una rama científica completamente diferente como lo es la elaboración de diversos medicamentos; por ejemplo, el carbonato y el citrato de litio, los cuales son recursos medicinales para producir diversos fármacos usados especialmente en casos psiquiátricos, antidepresivos e incluso para el tratamiento del desorden psíquico llamado 'trastorno bipolar'[3]. Las sales de litio, sobre todo el carbonato de litio, se pueden emplear en las ciencias médico-psiquiátricas para el tratamiento del síndrome maniaco o manía, para males depresivos, para tratar trastornos de bipolaridad y otras psicopatologías más graves, aunque menos frecuentes. También es un estabilizador del estado de ánimo al trabajar de diversas formas, por ejemplo, bloqueando la liberación irregular de la dopamina, sustancia que realiza conexiones cerebrales entre neuronas[4].

Por otro lado, el litio también se utiliza para depurar el aire extrayendo el dióxido de carbono en submarinos. En las naves espaciales es requerido para el almacenamiento duradero de las baterías de naves en vuelos al espacio[5]. El cloruro y el bromuro de litio tienen elevada higroscopicidad, es decir, capacidad para absorber la humedad atmosférica, por lo cual son excelentes agentes secantes. Adicionalmente, el bromuro de litio se usa en bombas de calor de contracción, esto significa que expulsa el calor de un espacio frío, en otras palabras, hace lo mismo que una máquina frigorífica, pero con objetivo al revés: la de frigorífico absorbe calor y lo transforma en frío, la de calor toma frío y lo transforma en calor.

Otro elemento importante es el estearato de litio el cual es un lubricante usado en aplicaciones a alta temperatura. El hidróxido de litio, por su parte, se usa tanto en naves espaciales como en submarinos, en ambos casos con el mismo propósito esencial de depurar el aire y nuevamente hacerlo funcional dado que le extrae el dióxido de carbono[6].

Sin embargo, en cuanto a la revolución completa en el campo de la energía se refiere a un giro completo en fuentes de energía dado que se trata de una energía no contaminante y que, en muchos aspectos, es sumamente versátil. Las baterías de iones de litio son recargables en un inicio, lo cual es muy importante en tecnología de punta, la cual abarca la recarga de equipos de computadoras relativamente grandes o baterías de teléfonos celulares de la 5G, algunos tipos de robots o de ciertos aparatos propios de la llamada Inteligencia Artificial, etc. En cuanto a desarrollos futuros, podría utilizarse para viajes muy largos de vehículos terrestres o aéreos, sobre todo, de vuelos espaciales con pasajeros relativamente numerosos, en los que podría necesitarse de tiempos prolongados de espera antes de regresar a nuestro planeta, o bien, para instalar fuentes de recarga en las diversas estaciones espaciales.

Adicionalmente, el litio es un componente común en aleaciones de aluminio, cadmio, cobre y manganeso, éstas son empleadas en ciertas etapas de la construcción aeronáutica que implican dicha aleación. También pueden ser usadas en la creación de lentes de telescopios de gran magnitud, por ejemplo, el telescopio de Monte Palomar. Finalmente, puede tener implicaciones en el manejo de energías nucleares y atómicas [2].

Regiones productoras de litio en el mundo

Pese a que ha sido conocido desde hace 200 años y aprovechado en diferentes actividades, en años recientes su uso ha sido más valorado, sobre todo en lo que respecta a las baterías de las tecnologías de alta duración, por lo que se generó una mayor demanda en la extracción y transformación del litio. En 2019, los países con una mayor producción por toneladas de dicho mineral fueron: Australia (42 mil); Chile (18 mil); China (7 mil 500); Argentina (6 mil 400); Portugal (1,200); Namibia (500); Brasil (300); Canadá (200); Estados Unidos (s/d) y Zimbabwe (s/d). En tanto, las mayores reservas están localizadas en Australia (62 millones 800 mil); Chile (8 millones 600 mil); Argentina (un millón 700 mil); China (un millón); Estados Unidos (630 mil); Canadá (370 mil); Brasil (95 mil) y Portugal (60 mil)[7].

Debido a la importancia del sector minero en la economía nacional, el marco legal del litio en México está previsto en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En su artículo 27 señala que “corresponde a la Nación el dominio directo de todos los recursos naturales de la plataforma continental y los zócalos submarinos de las islas; de todos los minerales o sustancias que se encuentran en vetas, mantos, masas o yacimientos”[8]. Asimismo, el artículo 73, fracción X de la Carta Magna faculta al Congreso Mexicano para legislar acerca de la minería. El artículo 123, fracción XII, obliga a las empresas -entre ellas las mineras- a generar condiciones de seguridad e higiene a las y los trabajadores de dichas labores.

Por su parte, la Ley Minera establece en su artículo 4 al litio como uno de los “minerales o sustancias que en vetas, mantos, masas o yacimientos constituyen depósitos distintos de los componentes de los terrenos”[8]. La última reforma a este párrafo fue realizada a finales de abril de 2005. Además de las leyes federales existentes acerca de un elemento en particular, únicamente está vigente la Ley que Declara Reservas Mineras Nacionales a los Yacimientos de Uranio, Torio y demás Substancias de las cuales se Obtengan Isótopos Hendibles que puedan Producir Energía Nuclear; ésta data de enero de 1950.

De acuerdo con la Secretaría de Economía (SE), a finales de 2018 “El país no cuenta con ningún yacimiento de litio en explotación. Sin embargo, en los estados de Baja California, San Luis Potosí, Zacatecas y Sonora se encuentran en etapa de exploración tres yacimientos que contienen este mineral”[2]. Por lo que, ante las posibilidades de la exploración comercial de dicho mineral, los esfuerzos aún son emergentes.

La dependencia también señaló que “la balanza comercial del litio, en el periodo 2006-2016, ha mostrado un saldo deficitario, derivado de la nula producción del mineral a nivel nacional. En 2016, las exportaciones fueron de apenas \$658 dólares y las importaciones fueron de \$1.6 millones, dando como resultado un déficit de \$1,625,987 dólares”[2]. Esto, pese a diferentes señalamientos acerca de la existencia de vetas de dicho mineral en algunas regiones del norte del país. Los municipios donde se localizan los yacimientos de litio en nuestro país se muestran en la Tabla 3. [9].

Tabla 3. Municipios donde se localizan los yacimientos de litio en México.

Entidad Federativa	Característica	Municipios
Sonora	Pegmantitas	Puerto Peñasco, Pitiquito, Tubutama, El Sáric, Aconchi, Nacozari, Huasabas, La Colorada, Suaqui Grande, Onavas, Soyopa, y Álamos
		Nogales y Agua Prieta
Chihuahua	Sedimentos	Ascención, Aldama, Cusiuhiriachi y Jiménez
Coahuila	Salmueras	Sierra Mojada y San Pedro
Zacatecas	Salmueras	Jiménez del Teúl, Fresnillo y Villa Hidalgo
San Luis Potosí	Salmueras	Santo Domingo, Villa de Ramos, Salinas, Moctezuma y Villa de Guadalupe

Fuente: Elaboración propia.

Situación de México en el mercado internacional del litio

México tiene importantes reservas de litio y es visto como un actor emergente en el mercado del litio. Sin embargo, el país actualmente carece de una capacidad de producción significativa e infraestructura para la extracción y refinación de litio. México busca desarrollar su sector de litio mediante la inversión de empresas internacionales, a fin de competir en la creciente demanda

mundial de litio, esto para su uso en baterías para vehículos eléctricos y almacenamiento de energía.

Sin embargo, México aún tiene que desarrollar completamente su industria del litio ya que tiene una capacidad de producción limitada en comparación con los principales productores de litio como Australia, Chile y China. El gobierno mexicano ha tomado medidas para atraer inversiones y promover el desarrollo de su sector de litio, como ofrecer incentivos fiscales y agilizar el proceso de obtención de permisos para proyectos de litio [7].

México ha firmado acuerdos con varias empresas internacionales, incluida Tesla, para explorar y extraer litio en el país. Estos acuerdos tienen como objetivo aumentar la capacidad de producción y establecer instalaciones de producción de baterías de iones de litio en México, lo que aumentaría la competitividad del país en el mercado del litio. Adicionalmente, México deberá competir con los productores de litio establecidos e invertir continuamente en tecnología e infraestructura para seguir siendo competitivo en el mercado global. A pesar de estos desafíos, las importantes reservas de litio del país y el apoyo del gobierno para el desarrollo de su sector del litio lo convierten en un actor emergente en el mercado del litio con un importante potencial de crecimiento [10].

Procesos de extracción y purificación

Si bien es cierto el litio se encuentra presente tanto en pegmatitas, salmueras, pozos petrolíferos, campos geotérmicos, arcillas e incluso en los océanos, en la actualidad solamente 2 procesos de obtención han demostrado ser económicamente factibles: mediante salmueras y pegmatitas [2]. En la Figura 1 se muestra el esquema de los procesos de obtención del litio, así como los productos que se obtienen de éstos.

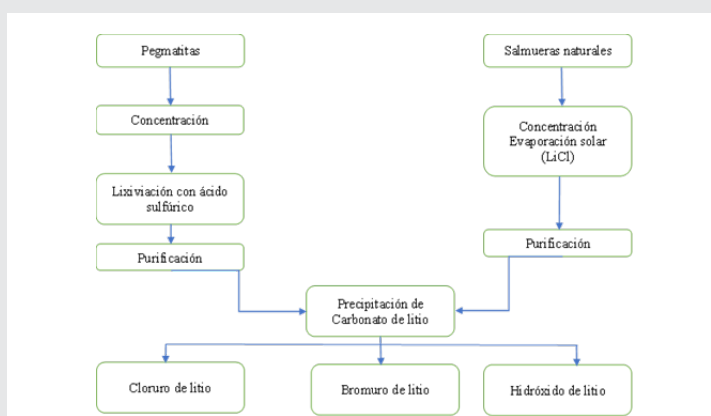


Figura 1. Procesos de extracción de litio.

Fuente: Elaboración propia.

Obtención a partir de Pegmatitas o depósitos “Roca dura”

Anteriormente la espodumena fue la principal fuente de obtención de carbonato de litio hasta que se inició

su explotación a través de su contenido en salmueras naturales. El mineral espodumena se concentra por flotación diferencial para obtener un concentrado con un contenido de 2.5 a 3.2% de litio, lo que equivale a 85 a 95% de espodumena. Para la producción de litio de la espodumena natural, el concentrado de éste debe ser calcinado previamente con caliza, posteriormente, mediante procesos de molienda, lixiviación, precipitaciones sucesivas, entre otros y dependiendo del agente tratante, se pueda extraer un alto porcentaje del litio, dando como resultado hidróxido de litio, carbonato de litio o cloruro de litio [2].

Obtención a partir de salmueras

México extrae litio principalmente a través de la extracción de salmuera, que consiste en bombear salmuera (agua salada con litio disuelto) desde los acuíferos subterráneos a la superficie y evaporar la salmuera para concentrar el litio. Una vez que la salmuera rica en litio se bombea a la superficie, se almacena en estanques de evaporación donde se deja evaporar durante varios meses, tiempo durante el cual aumenta la concentración de litio. La solución rica en litio resultante se procesa luego para extraer el litio y producir carbonato de litio, esta es la principal forma de litio utilizada en la producción de baterías de iones de litio.

El desarrollo del proceso de recuperación del litio a partir de salmueras tuvo un fuerte impacto en la industria, al constituir este proceso una fuente de litio con costos mucho más bajos en comparación a la obtención de litio a partir de los minerales pegmatíticos.

La composición de las salmueras en cuanto a los niveles de contenidos de litio varía considerablemente en la presencia de otros elementos como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, boro, bromo, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos, lo que requiere que cada salmuera sea tratada en forma particular, de acuerdo con su composición.

De manera general, la salmuera es bombeada a los estanques de baja profundidad y de dimensiones considerables donde, a partir del proceso de evaporación solar, comienzan a precipitar secuencialmente un conjunto de sales. De este modo, se extraen sales tales como cloruro de potasio, cloruro de sodio, sulfato de potasio, sulfato de sodio, así como de litio, las cuales presentan impurezas de magnesio, boro y sulfato.

Posteriormente, la salmuera concentrada de litio es transportada por camiones a las plantas de procesamiento, donde es sometida a procesos de purificación y precipitación a modo de obtener carbonato de litio con una pureza cercana al 99.5%, aunque el mercado exige un mínimo de 99.1%, el cual puede comercializarse en cristales o compactarse para ser vendido en forma de gránulos. El carbonato de litio puede ser la materia prima para la producción de hidróxido de litio

o de cloruro de litio de alta pureza. Este se utiliza en la obtención de litio metálico por electrólisis de sales fundidas [11].

Problemas socioambientales derivados del uso de litio

El impacto ambiental del litio en México es un tema de preocupación creciente a medida que el país se convierte en un importante productor de esta materia prima, crítica para la producción de baterías de iones de litio, las cuales se usan principalmente en vehículos y dispositivos electrónicos. Así como el litio tiene múltiples beneficios, el procesamiento y la extracción de litio pueden tener un impacto significativo en el medio ambiente. Este impacto incluye la contaminación del agua, la degradación del suelo, la emisión de gases de efecto invernadero y el uso de grandes cantidades de energía.

En el caso de México, la extracción de litio se ha concentrado en la región de Sonora [10], donde los pozos de extracción de litio pueden interferir con los recursos hídricos y la calidad del agua en la zona [12]. Además, la producción de litio puede requerir la generación de energía a partir de combustibles fósiles, lo que puede aumentar la huella de carbono del país.

Sin embargo, es posible mitigar los impactos ambientales del litio a través de la investigación e implementación de prácticas sostenibles en la producción. Por ejemplo, es posible utilizar tecnologías que reduzcan el uso de agua y energía en el procesamiento de litio, adicionalmente se puede promover la reutilización y el reciclaje de baterías de litio. Por otro lado, es importante garantizar la participación y la anuencia de las comunidades locales en la toma de decisiones relacionadas con la extracción de litio, para minimizar los impactos negativos en las personas y los medios de subsistencia [13].

Además de los impactos mencionados anteriormente, la extracción de litio puede dejar una huella significativa en la biodiversidad y los ecosistemas naturales. Por ejemplo, la construcción de infraestructuras para la extracción de litio puede interferir con las rutas migratorias de animales y afectar la calidad de vida de los ecosistemas locales. Es importante destacar que la extracción de litio a gran escala puede requerir la remoción de grandes áreas de tierra, lo cual puede resultar en la degradación del suelo y la pérdida de hábitats naturales.

En cuanto a la atmósfera, el procesamiento de litio puede generar emisiones de gases de efecto invernadero, así como otros contaminantes atmosféricos que pueden tener un impacto negativo en la calidad del aire y el clima [14].

En términos sociales, la extracción de litio puede afectar a las comunidades locales [13], promoviendo el

desalojo de personas y la pérdida de tierras y recursos naturales. Es importante garantizar que los derechos y las necesidades de las comunidades locales sean protegidos y considerados en el proceso de extracción de litio. Por lo tanto, es importante tener en cuenta el impacto ambiental y social del litio en México, así como trabajar hacia una producción sostenible que mitigue estos impactos y garantice un futuro sostenible para las personas y el planeta. Lo anterior incluye la promoción de la investigación, desarrollo y la adopción de prácticas y tecnologías más sostenibles en la producción de litio.

Alternativas con potencial de sustituir a litio en su uso en baterías

La batería de iones de litio ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones electrónicas debido a su alta densidad de energía y bajo costo. Por lo tanto, la dependencia exclusiva del litio ha llevado a una búsqueda de alternativas que puedan proporcionar una solución más sostenible y diversificada. En este sentido, varios materiales se han investigado como posibles alternativas al litio en baterías, algunas de estas opciones incluyen el grafito, el litio-sulfuro, estaño, níquel-hidruro y litio-fósforo [15-17].

El grafito es un material ampliamente utilizado en baterías de iones de litio como ánodo, su reevaluación como alternativa al litio se debe a su bajo costo y mayor seguridad en comparación con el litio. Las baterías de litio-sulfuro tienen una mayor capacidad de energía que las baterías de iones de litio, lo cual las convierte en una alternativa promisorio [18]. Por otro lado, se encuentra el estaño, se trata de un metal de transición que ha demostrado ser una alternativa viable para el litio en las baterías de iones de litio. Las baterías de níquel-hidruro también tienen una mayor densidad de energía que las baterías de litio-ion [19], mientras que las baterías de litio-fósforo también han demostrado tener una alta densidad de energía, lo cual las hace viables como otra alternativa al uso del litio.

Otro tipo de baterías a considerar son las baterías de sodio [20], éstas tienen un mejor rendimiento y pueden trabajar a mayores temperaturas. Su materia prima (NaCl) es una de las más abundantes en el planeta y se obtiene por la evaporación del agua salada, lo que lo hace un material barato y sostenible, además de no necesitar otro componente para purificarse, a diferencia del litio que necesita del cobalto. Adicionalmente, son más ligeras, lo que aumentaría el rendimiento al instalarse grandes baterías en autos eléctricos, o vehículos sometidos a altas temperaturas, reduciendo también el riesgo de explosión.

Las baterías de estado sólido [19] sustituyen el electrolito líquido de las baterías de litio por uno en estado sólido, lo que reduce el peligro de ignición en los vehículos eléctricos y elimina los sistemas de seguridad

que evitan la acumulación de calor, reduciendo espacio y peso, así como costos de manufactura.

Como una solución alternativa a más largo plazo se perfila la batería de hidrógeno [21], este tipo de batería genera energía eléctrica a partir de una reacción química, por ello se considera funcional siempre y cuando se le suministre oxígeno e hidrógeno. Estas baterías no contaminan, tienen alto rendimiento en operación continua, no vibran y son silenciosas. Sin embargo, la conversión de hidrógeno en energía eléctrica resulta con una eficiencia significativamente menor a almacenar directamente la energía eléctrica en una batería de litio. Sumado a lo anterior, el suministro, transporte y producción de hidrógeno hacen que el uso de este tipo de baterías no sea rentable a la fecha.

Finalmente, el grafeno [22], como uno de los materiales más ligeros, finos y resistentes puede extender su uso hacia los supercondensadores [23]. El uso de estos materiales en los supercondensadores podría mejorar la eficiencia de energía de este material y competir directamente con las baterías de litio hasta volverse un componente esencial en los dispositivos electrónicos ya que estas baterías duran tres veces más que las baterías de iones de litio y no necesitan mantenimiento ni carga.

Propuestas estratégicas para México en la industria de litio

1. Desarrollo de un marco regulatorio sólido y transparente
 - Financiar investigaciones en métodos de extracción más sostenibles (por ejemplo, tecnologías de bajo consumo de agua o de reducción de residuos).
 - Promover la investigación en alternativas al litio para baterías, como el sodio, magnesio o tecnologías emergentes.
 - Establecer colaboraciones con universidades, centros de investigación y empresas internacionales para innovar en procesos y productos.
2. Impulso a la investigación y desarrollo (I+D) Garantizar la protección de comunidades locales y su inclusión informada en los procesos de decisión.
 - Financiar investigaciones en métodos de extracción más sostenibles (por ejemplo, tecnologías de bajo consumo de agua o de reducción de residuos).
 - Promover la investigación en alternativas al litio para baterías, como el sodio, magnesio o tecnologías emergentes.
 - Establecer colaboraciones con universidades, centros de investigación y empresas internacionales para innovar en procesos y productos.
3. Desarrollo de infraestructura industrial
 - Invertir en plantas de procesamiento de litio dentro del país, evitando que las materias primas sean exportadas sin valor agregado.
 - Invertir en plantas de procesamiento de litio dentro del país, evitando que las materias primas sean exportadas sin valor agregado.

- Establecer cadenas de suministro para la producción de baterías, enfocándose en la electromovilidad, el almacenaje de energía y otros usos estratégicos.
 - Explorar la posibilidad de asociarse con empresas tecnológicas para desarrollar una industria manufacturera avanzada en baterías.
4. Protección ambiental y desarrollo sostenible
 - Implementar políticas de restauración de áreas afectadas por la minería, como reforestación o compensación ambiental.
 - Crear un fondo de sostenibilidad financiado por las empresas mineras para invertir en proyectos de conservación ambiental y desarrollo comunitario.
 - Fomentar el uso de tecnologías de minería verde o menos invasiva.
 5. Incorporación de las comunidades locales
 - Diseñar esquemas de reparto de beneficios con comunidades afectadas por la extracción, como regalías o proyectos de desarrollo social (educación, salud e infraestructura).
 - Establecer acuerdos de consulta previa, libre e informada para garantizar que las comunidades sean partícipes del proceso de toma de decisiones.
 6. Fortalecimiento de la posición de México en el mercado internacional
 - Crear alianzas estratégicas con países líderes en la industria del litio (Chile, Australia, China) para intercambiar tecnologías y mejores prácticas.
 - Participar activamente en acuerdos y bloques regionales que impulsen el comercio de litio y productos derivados.
 - Promover a México como un actor confiable en la cadena de suministro global, destacando sostenibilidad y proximidad al mercado estadounidense.
 7. Educación y capacitación
 - Diseñar programas educativos enfocados en minería responsable, química de materiales y manufactura avanzada de baterías.
 - Formar una fuerza laboral especializada para cubrir las necesidades de la industria del litio y su cadena de valor.

RESULTADOS

Potencial económico del litio en México

México posee un potencial significativo para posicionarse como un actor relevante en la industria global del litio, sustentado principalmente en el yacimiento de litio en Sonora, considerado uno de los más grandes del mundo. Este recurso estratégico podría contribuir al crecimiento económico nacional mediante su integración en cadenas de valor vinculadas a la electromovilidad y almacenamiento de energía. Sin embargo, las proyecciones económicas revelan que el impacto en el Producto Interno Bruto (PIB) dependerá de factores clave como la viabilidad de extracción y refinamiento, así como de las políticas públicas que favorezcan la inversión y el desarrollo tecnológico.

Viabilidad industrial y tecnológica

El análisis de las capacidades industriales actuales en México exhibe una carencia de infraestructura adecuada para el refinamiento de litio y la fabricación de baterías a escala comercial. En comparación con países como Chile, China y Australia, México enfrenta desventajas significativas en términos de costos y experiencia técnica. Por otro lado, la implementación de tecnologías más sostenibles, como la extracción directa de litio (DLE, por sus siglas en inglés), podría posicionar a México como un país competitivo en la industria, siempre y cuando se superen las limitaciones actuales en investigación y desarrollo.

Impacto de las políticas públicas y desafíos legales

El establecimiento de LitoMx como empresa estatal responsable de la explotación y manejo del litio plantea un desafío considerable. Si bien esta medida busca asegurar el control soberano del recurso, la falta de un marco normativo claro y transparente ha generado incertidumbre entre inversionistas nacionales y extranjeros. Además, los conflictos sobre derechos de propiedad y uso del suelo en las áreas con potencial minero podrían retrasar proyectos estratégicos. En este contexto, la comparación con modelos de gestión en otros países indica que una colaboración público-privada podría ser más positiva para impulsar el desarrollo de la industria.

Sostenibilidad y contexto ambiental

El análisis del impacto ambiental asociado con la extracción de litio en México recalca preocupaciones sobre el consumo de agua y las afectaciones a ecosistemas locales, particularmente en regiones áridas como Sonora. Sin embargo, la adopción de tecnologías menos invasivas, junto con regulaciones ambientales estrictas, podría mitigar estos efectos. Asimismo, existe una oportunidad para desarrollar un modelo de minería responsable que posicione a México como un referente en sostenibilidad dentro del sector.

CONCLUSIONES

El litio representa una oportunidad estratégica para México, no solo por su potencial económico, sino también por su capacidad para impulsar la transición hacia un modelo energético más sustentable. Sin embargo, el aprovechamiento de este recurso enfrenta múltiples desafíos que requieren atención inmediata y coordinada. En términos económicos, la riqueza potencial del yacimiento en Sonora puede contribuir al desarrollo industrial y tecnológico, posicionando a México como un actor relevante en cadenas de valor globales vinculadas a la electromovilidad y al almacenamiento de energía. No obstante, el impacto real en la economía nacional dependerá de políticas públicas que fomenten la inversión, la innovación y la competitividad frente a otros países líderes en el mercado.

Desde una perspectiva industrial, las limitaciones actuales en infraestructura, tecnología y experiencia minera

dificultan la extracción y el refinamiento eficiente del litio. La adopción de tecnologías sostenibles y colaboraciones público-privadas podrían ofrecer soluciones viables, siempre y cuando se desarrollen bajo un marco regulatorio claro y transparente. Asimismo, los desafíos legales y sociales, como la gestión de derechos territoriales y la incertidumbre regulatoria, deben ser abordados para garantizar el desarrollo equitativo y sostenible de esta industria. La creación de LitoMx refleja un paso hacia el control soberano del recurso, pero su éxito dependerá de su capacidad para atraer inversiones y fomentar la cooperación con el sector privado.

Finalmente, el componente ambiental no puede ignorarse o menospreciarse. Las preocupaciones sobre el impacto ecológico de la extracción de litio subrayan la necesidad de adoptar prácticas responsables y sostenibles que minimicen daños a los ecosistemas locales. México tiene la oportunidad de convertirse en un referente global en minería sostenible si integra criterios ambientales en todas las etapas de la cadena productiva.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Tecnológico Nacional de México (TecNM) a la investigación científica y tecnológica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] V. Bravo, *Algo Sobre El Litio Recopilado Por Víctor Bravo*, (2019).

[2] Dirección general de desarrollo minero, *Perfil de mercado del Litio*, Secr. Econ. 1 (2018) 4–10. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil_Litio_2018__T_.pdf.

[3] F. Mármod, *Litio: 55 años de historia en el tratamiento del trastorno bipolar*, Med. Clin. (Barc). 127 (2006) 189–195. <https://doi.org/10.1157/13090712>.

[4] M. Ramírez-Santana, S. Cortés Arancibia, V.C. Bachelet, *Minería del litio: ¿Cómo enfrentar desde la ciencia un nuevo escenario de exposición en trabajadores que no ha sido antes estudiado?*, Medwave. 24 (2024) e3029. <https://doi.org/10.5867/medwave.2024.09.3029>.

[5] D.E. Williams, L.R. Pate, C. Hoffman, *The Lithium Hydroxide Management Plan for Removing Carbon Dioxide from the Space Shuttle while Docked to the International Space Station*, in: 2003. <https://doi.org/10.4271/2003-01-2491>.

[6] Annual report, Naval Group, <https://www.Naval-Group.Com/Wp-Content/Uploads/2018/04/Rapport-Financier-2017-En-1.Pdf>. (2017).

[7] J. Pablo, A. Quezada, *Regulación del litio. Propuestas*, (2021).

- [8] Diario Oficial de la federación, Constitución política de los Estados Unidos Mexicanos, D. Of. La Fed. (2016) 1-194.
- [9] H.I. Flor de María, DEPÓSITOS DE LITIO EN MÉXICO, (2020).
- [10] J. Ramón, S. Moreno, México con Chihuahua y Sonora, mayor depósito mundial de litio: un recurso destinado a suplantar sociedades fincadas en petróleo, (n.d.).
- [11] M. Valdez-Rodríguez, A. Cabanillas-de-la-Cruz, X.V. Patiño-Guarneros, Perspectivas de la extracción de litio en México y sus impactos socioambientales, *Prod. Agropecu. y Desarr. Sosten.* 12 (2024) 83-98. <https://doi.org/10.5377/payds.v12i1.17418>.
- [12] H. Rubio-Arias, C.E. Quintana, K. Wood, R.A. Saucedo, R. Bautista-Margulis, Vanadium and lithium contamination in freshwaters of the Conchos River in Chihuahua, Mexico, *WIT Trans. Biomed. Heal.* 11 (2007) 171-179. <https://doi.org/10.2495/EHR070181>.
- [13] R. De Anda-márquez, M.A. García-zarate, ¿Alteraciones / cambios ? socioambientales potenciales en la Sierra Alta de Sonora a partir de la minería de litio 1, (n.d.) 1-6.
- [14] F. Malte Dorn, ¿Descarbonización o despojo? La economía política de litio e hidrógeno verde en Argentina, *Rev. Ciencias Soc.* 37 (2024). <https://doi.org/10.26489/rvs.v37i55.5>.
- [15] L. Li, Y. Lu, Q. Zhang, S. Zhao, Z. Hu, S. Chou, Recent Progress on Layered Cathode Materials for Nonaqueous Rechargeable Magnesium Batteries, *Small.* 17 (2021) 1902767. <https://doi.org/10.1002/smll.201902767>.
- [16] C. Han, W. Li, H.K. Liu, S. Dou, J. Wang, Principals and strategies for constructing a highly reversible zinc metal anode in aqueous batteries, *Nano Energy.* 74 (2020) 104880. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104880>.
- [17] T. Ohzuku, A. Ueda, Why transition metal (di) oxides are the most attractive materials for batteries, *Solid State Ionics.* 69 (1994) 201-211. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(94\)90410-3](https://doi.org/10.1016/0167-2738(94)90410-3).
- [18] K. Ozawa, Lithium-ion rechargeable batteries with LiCoO₂ and carbon electrodes: the LiCoO₂/C system, *Solid State Ionics.* 69 (1994) 212-221. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(94\)90411-1](https://doi.org/10.1016/0167-2738(94)90411-1).
- [19] M.S. Whittingham, Lithium batteries and cathode materials, *Chem. Rev.* 104 (2004) 4271-4301. <https://doi.org/10.1021/cr020731c>.
- [20] D. Geng, N. Ding, T.S.A. Hor, S.W. Chien, Z. Liu, D. Wu, X. Sun, Y. Zong, From Lithium-Oxygen to Lithium-Air Batteries: Challenges and Opportunities, *Adv. Energy Mater.* 6 (2016). <https://doi.org/10.1002/aenm.201502164>.
- [21] A. Salehabadi, E.A. Dawi, D.A. Sabur, W.K. Al-Azzawi, M. Salavati-Niasari, Progress on nano-scaled alloys and mixed metal oxides in solid-state hydrogen storage; an overview, *J. Energy Storage.* 61 (2023) 106722. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106722>.
- [22] J. Bi, Z. Du, J. Sun, Y. Liu, K. Wang, H. Du, W. Ai, W. Huang, On the Road to the Frontiers of Lithium-Ion Batteries: A Review and Outlook of Graphene Anodes, *Adv. Mater.* 35 (2023). <https://doi.org/10.1002/adma.202210734>.
- [23] A. Dutta, S. Mitra, M. Basak, T. Banerjee, A comprehensive review on batteries and supercapacitors: Development and challenges since their inception, *Energy Storage.* 5 (2023). <https://doi.org/10.1002/est2.339>.





Ciencias *de la* Computación

Ingeniantes

Aplicación web adaptativa para la monitorización y graficación de datos en tiempo real



Colaboración

Erica María Lara Muñoz; Israel Viveros Torres,
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Alvarado

Fecha de recepción: 07 de mayo de 2024

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2024

RESUMEN: El presente artículo tiene como objetivo mostrar el desarrollo de una aplicación web adaptativa, realizada con la finalidad de interpretar y graficar datos en tiempo real de un prototipo mecánico rotativo. Esto se logró a través de la creación de una base de datos que almacena los registros de las vibraciones generadas por el prototipo, la creación de una API para establecer la comunicación entre la base de datos y la aplicación web, y la conexión de la API con un microcontrolador Atmel 328 para la transmisión de los datos en tiempo real. Los resultados obtenidos fue una aplicación web interactiva, responsiva y accesible que permite a los usuarios visualizar estadísticas, gráficas y datos recopilados en tiempo real de un banco de vibraciones mecánicas, lo que significa que se puede obtener un monitoreo continuo del comportamiento del prototipo, un análisis predictivo para llevar el prototipo mecánico a su máximo potencial y conocer cuando realizar un mantenimiento preventivo o correctivo en caso de ser necesario.

PALABRAS CLAVE: Análisis predictivo, API, aplicación web adaptativa, Arduino, graficar datos, monitorización, prototipo mecánico, tiempo real.

ABSTRACT: The objective of this paper is to show the development of an adaptive web application, with the purpose of interpreting and graphing data in real time of a rotating mechanical prototype. This was achieved through the creation of a database that stores the vibrations records generated by the prototype, creating an API to establish communication between the database and the web application and connecting the API with an Atmel 328 microcontroller for real time data transmission. The results were an interactive, responsive and accessible web application that allows users to visualize statistics, graphs and data collected in real time from the mechanical vibration bank, which means that you can obtain a continuous monitoring of the behavior of the prototype, a predictive analysis to bring the mechanical prototype to its full potential and know when to perform preventive or corrective maintenance if necessary.

KEYWORDS: Predictive analysis, API, responsive web application, Arduino, graph data, monitoring, mechanical prototype, real time.

INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos, han propiciado que las personas cada vez se hagan más dependientes de las tecnologías, éstas se vuelven más indispensables en cualquier ámbito de la vida, ya sea para uso personal [1], educativo [2][3], profesional [4] o empresarial [5][6]. Dentro de la industria, éstas pueden automatizar procesos [7], mejorar la interacción, apoyar en la comunicación y la colaboración entre trabajadores, pero, sobre todo, se puede tener mayor impacto, al utilizar las tecnologías para desarrollar aplicaciones o sistemas, que permitan analizar grandes cantida-

des de información, datos para la toma de decisiones y mejorar incluso, los procesos de una organización o industria y el rendimiento de maquinaria y equipos.

Sin embargo, dentro de la industria aún hay cosas por hacer. Un aspecto muy común que ocurre es el desbalance en los sistemas de tipo rotatorio, esto es, una afectación muy recurrente en el sector industrial que genera índices muy altos de vibraciones mecánicas en las máquinas y sistemas de potencia, por lo que es muy importante realizar un diagnóstico adecuado y su corrección cuando las vibraciones se detecten para evitar una falla grave [8].

Debido a este fenómeno que ocurre en la industria, en los últimos tiempos, se ha observado el interés en utilizar técnicas de mantenimiento predictivo para el cuidado de maquinaria y equipos, con la finalidad de que éstas operen de forma más eficiente, y se disminuyan fallas que eviten tiempos muertos en la industria [9] o fallas, incluso fatales [8].

Este mantenimiento predice cuando una maquinaria o equipo, requiere de una reparación o cambio de pieza. Para ello, dentro de la industria, se utiliza el monitoreo y análisis de vibraciones, con la finalidad de conocer el estado de la salud mecánica de la maquinaria y prevenir algún fallo antes de que se origine [10], ya que con el análisis de vibraciones se puede anticipar a un mal funcionamiento, extendiendo de esta manera la vida útil y productividad de la maquinaria o equipo.

La industria 4.0 definida como la integración de maquinaria y dispositivos físicos complejos con sensores y software en red, utilizados para predecir, controlar y planificar mejores resultados comerciales y sociales [11], apoya el monitoreo y análisis de vibraciones, debido a que permite entre otras cosas, la comunicación en tiempo real entre dispositivos, sistemas y usuarios haciendo uso de tecnologías y servicios de internet [12].

Por estas razones, la importancia de realizar sistemas o aplicaciones que impulsen esta industria inteligente y permitan eficientar los procesos y la toma de decisiones dentro de la empresa e incluso prevenir alguna falla en la maquinaria o equipo utilizado.

Por lo que a continuación, se muestra un sistema que permite monitorear datos en tiempo real de un banco de vibraciones mecánicas, con la finalidad de garantizar que opere eficientemente, minimice sus tiempos de paro y se le pueda realizar un mantenimiento preventivo o correctivo de manera oportuna.

MATERIAL Y MÉTODOS

Recursos materiales

Para la elaboración de la aplicación web, se hizo uso de hardware, software e infraestructura tecnológica, las cuales, en su conjunto, se combinan de manera sinérgica permitiendo la creación de la aplicación dinámica para la

interpretación y graficación de datos en tiempo real para un banco de vibraciones mecánicas. Cada uno de estos recursos, fue seleccionado de manera cuidadosa para garantizar un óptimo rendimiento y la confiabilidad del sistema.

Para el caso del hardware se utilizó un prototipo de banco de vibraciones, un sensor MPU6050, un ESP32 y una computadora de alto rendimiento.

Prototipo de banco de vibraciones. Construido en aluminio anodizado, material aplicable por su rigidez y ligereza apropiada para este tipo de aplicaciones, aportando así también movilidad en el dispositivo. Este sistema está dotado como unidad de potencia motriz, un motor de corriente alterna, símil a un equipo industrial. El prototipo [8] busca emular una maquinaria rotatoria con elementos de fijación por medio de chumaceras en dos puntos específicos del eje, a fin de evaluar las vibraciones en dos planos. El dispositivo antes descrito se utiliza como el componente físico central y generador de las señales dinámicas que serán adquiridas y mostradas por la aplicación en tiempo real, así como implementar la simulación de un desbalance dinámico para la generación de datos anómalos de funcionamiento, proporcionando una base realista para la evaluación y monitoreo.

Sensor MPU6050. Este sensor [8], aplicado como un transductor realiza la conversión de parámetros físicos a señales eléctricas normalizadas de 5VCC, este elemento es estrictamente un acelerómetro de tipo análogo de simple implementación para la medición de vibraciones, desempeña un papel fundamental al capturar datos precisos para su posterior procesamiento y análisis.

ESP32. Es un protocolo de comunicación altamente utilizado como estándar de comunicación para microcontroladores, el cual resulta en desempeño altamente eficiente para esta aplicación por su transmisión de datos en "paquetes" de bytes, que permite un manejo dinámico y robusto de la información, sin demandar altos costes de procesamiento de capacidad de cómputo por parte del microcontrolador y por ende de la aplicación en sí misma. Este protocolo resulta más que adecuado para la transmisión en tiempo real de datos de vibración a través de la API, lo anterior con base en las consideraciones técnicas antes citadas. El ESP32 asegura la conectividad eficiente y confiable entre el hardware físico y la infraestructura digital [13].

Computadora de alto rendimiento. Una computadora equipada con un procesador i5 de octava generación, 32 GB de RAM y 1 TB de SSD con la finalidad de que proporcione el entorno de desarrollo robusto necesario para ejecutar las aplicaciones y procesos intensivos de software.

El software utilizado fue React, Node.js, PostgreSQL y Socket.io, las razones por las que se utilizaron estas interfaces son las siguientes.

React. Es una biblioteca de Javascript de código abierto [14], que fue diseñada para generar interfaces de usuario con la finalidad de que el desarrollo de las aplicaciones sea más fácil. Fue utilizado en el desarrollo del frontend de la aplicación web, ya que ofrece una estructura modular y eficiente para crear interfaces de usuario interactivas y receptivas.

Node.js. Es un entorno de código abierto multiplataforma de JavaScript en tiempo de ejecución del lado del servidor, esencial para la implementación de la API, ya que es basada en eventos, permitiendo una gestión eficiente de las operaciones del servidor y facilitando la comunicación con la base de datos [15].

PostgreSQL. Es el sistema de código abierto y orientado a objetos de gestión de base de datos relacional que garantiza la integridad y consistencia de los datos, es fundamental para el almacenamiento y recuperación eficiente de la información generada por el banco de vibraciones [16].

Socket.io. Utilizado para la integración de WebSockets, facilitando la transmisión en tiempo real de datos entre el ESP32 y la aplicación web, asegurando de esta manera, una actualización instantánea de la información [15].

La infraestructura tecnológica utilizada fue un servidor VPS y un dominio.

Servidor VPS. Es un servidor privado virtual que se implementa para alojar la API, aprovechando la capacidad de ejecutar Node.js y garantizando un acceso constante a los servicios ofrecidos por la aplicación.

Dominio. Sistema de nombre de dominio, utilizado para la identificación clara y accesible de la aplicación web, proporcionando una interfaz intuitiva para los usuarios finales.

Metodología

La aplicación web se realizó siguiendo una serie de iteraciones definidas que permitieron una gestión flexible y eficiente en el desarrollo de la misma. La primera iteración consistió en el análisis de los requerimientos y la planificación inicial, posteriormente se hace la configuración del entorno y el prototipado, como tercera iteración se desarrolla la base de datos y se crea la API, en la iteración cuatro se realiza la integración del hardware y la configuración del WebSockets, la iteración 5 realiza la validación de notificaciones y funcionalidades, en la iteración 6 se realizó el desarrollo de la página web y la validación del diseño responsivo, finalmente para la iteración 7, se hacen las pruebas finales y la preparación para la implementación. Estas iteraciones las puede observar en la Figura 1. Para la parte de adaptabilidad, se hace uso del React.js ya que proporciona bibliotecas y componentes diseñados para sitios web, mismos que permiten la adaptación de los diversos dispositivos móviles, pudiendo visualizar correctamente en pantallas de todos los tamaños. Un com-

ponente responsivo utilizado fue Tailwind CSS para darle los estilos al administrador, este es un framework de CSS de código abierto que permite crear diseños adaptables y personalizados para sitios web.



Figura 1. Iteraciones para el desarrollo de la aplicación web adaptativa.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de requerimientos y planificación inicial. Se realiza el análisis detallado de los requerimientos y la planificación inicial de las actividades, definiendo roles y actividades.

Configuración del entorno y prototipado. Se configuran los entornos React, Node.js y PostgreSQL quedando listos para la implementación (ver Figura 2), y se desarrolla el prototipo de interfaz de usuario válido.

```

BACK_NODE > src > JS app.js > ...
You, hace 2 meses | 1 author (You)
1 // app.js You, hace 2 meses + base del proyecto
2 const express = require("express");
3 const cors = require("cors");
4 const app = express();
5 const swaggerUI = require("swagger-ui-express");
6 const openApiConfiguration = require("./docs/swagger");
7 const morganBody = require("morgan-body");
8 const customHeader = require("./middleware/customHeader");
9 const { dbConnectPostgresSql } = require("./database/postgres");
10 const path = require('path');
11
12 if (process.env.NODE_ENV === 'production') {
13   require('dotenv').config({ path: 'production.env' });
14 } else {
15   require('dotenv').config({ path: '.env.dev' });
16 }
17
18 app.use("/api/storage/users", express.static(path.join(__dirname, 'storage/users')));
19 app.use("/api/storage/logos", express.static(path.join(__dirname, 'storage/logos')));
20 app.use(cors());
21 app.use(express.json());
22 dbConnectPostgresSql();
23 morganBody(app, {
24   noColors: true,

```

Figura 2. Entorno de desarrollo.

Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de la base de datos y creación de la API. La base de datos se desarrolla haciendo uso de PostgreSQL y se crea la API utilizando Node.js para la comunicación con la base de datos.

Integración del hardware y configuración del Web-Socket. Se integra el ESP32 para la transmisión de datos en tiempo real y se configura el WebSocket para la comunicación bidireccional.

Validación de notificación y funcionalidades. Se implementa el envío de notificaciones y se validan haciendo pruebas de funcionalidades clave en la base de datos. Figura 3.

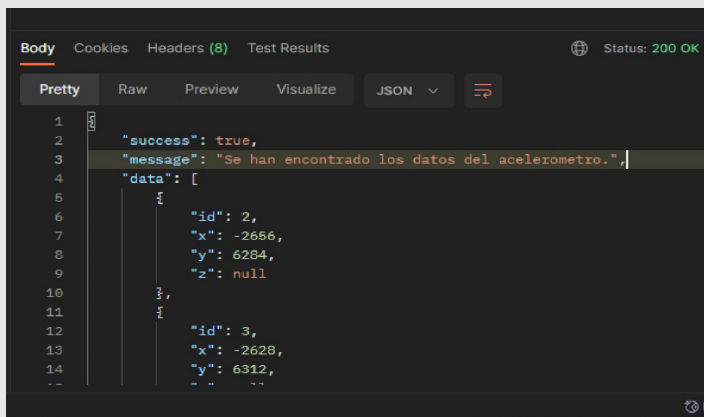


Figura 3. Validación de datos recibidos en la base de datos.
Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de página web y validación del sistema responsivo. Se desarrolla la interfaz de usuario utilizando React y se valida el diseño responsivo en diferentes dispositivos y pantallas. Esto se puede observar en las Figuras 4 y 5.



Figura 4. Dashboards de la aplicación web.
Fuente: Elaboración propia.

Pruebas finales y preparación para la implementación. Se realizaron las pruebas exhaustivas de todas las funcionalidades y la preparación de la aplicación e infraestructura para la implementación.



Figura 5. Vista de dashboard de dispositivo móvil.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Ejecutando todas las iteraciones para el desarrollo de la aplicación web adaptativa, se obtuvo una aplicación completamente funcional para la interpretación y graficación de datos en tiempo real de un banco de vibraciones mecánicas, la implementación exitosa de cada iteración garantiza la eficiencia operativa, la monitorización constante y la capacidad de respuesta a cambios en la infraestructura.

La interfaz de la aplicación web muestra de inicio, una pantalla para que el usuario abra su sesión, la cual proporciona un acceso seguro a la aplicación, en donde los usuarios pueden ingresar sus credenciales para autenticarse. La pantalla de inicio está diseñada con una disposición intuitiva, facilitando una experiencia de usuario amigable al guiar al usuario a través de este proceso de autenticación de manera clara y efectiva. La elección de elementos visuales y su disposición estratégica contribuye a la usabilidad de la aplicación web, asegurando una interacción inicial sin contratiempos para los usuarios. Esto se puede observar en la Figura 6.

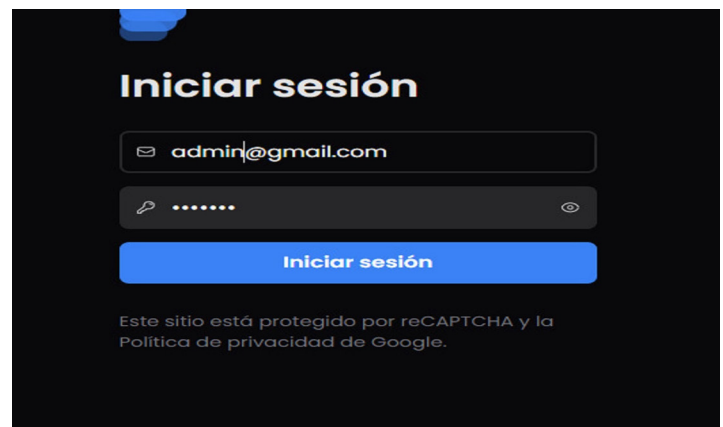


Figura 6. Vista del login.
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 7, con la finalidad de que el usuario personalice su experiencia y agregue un toque estético y albergue opciones esenciales relacionadas con su perfil de usuario, la aplicación web permite ajustar el modo de visualización y el tamaño de la letra, asegurando de esta manera, una adaptabilidad óptima a las preferencias individuales de los usuarios. Esta funcionalidad amplía la accesibilidad de la aplicación web, además de reflejar un enfoque centrado en el usuario, que proporciona herramientas para personalizar la interfaz de acuerdo con sus preferencias. La inclusión del pie de página del navegador ofrece una navegación conveniente que permite al usuario ajustar su configuración y explorar su perfil sin interrumpir la visualización principal de los datos que se estén analizando de las vibraciones mecánicas del equipo rotatorio.

sistema, como nombres, roles y detalles de contacto. Su diseño permite una fácil búsqueda y clasificación, proporcionando a los administradores un acceso rápido a la información necesaria para la gestión de usuarios. Así mismo, tener la facilidad de crear más usuarios para que puedan acceder al panel con diferentes permisos.

La advertencia relacionada con eventos de inicio de sesión se realiza a través de un correo electrónico, el cual, es una capa adicional de seguridad, notificando a los usuarios sobre cualquier actividad sospechosa en sus cuentas. La información detallada en el correo electrónico proporciona pistas sobre la ubicación, hora y dispositivo asociado, permitiendo una rápida identificación y respuesta a posibles amenazas de seguridad en el acceso a la aplicación.

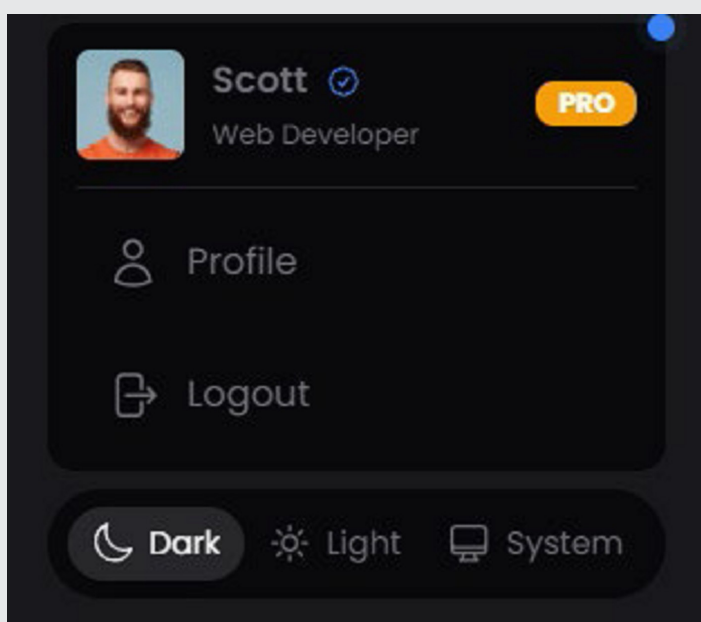


Figura 7. Pie de página del navegador.
Fuente: Elaboración propia.

ID	x	y	z
2	-2656	6284	
3	-2628	6312	
4	-2600	6276	
5	-2600	6276	
6	-2668	6312	

Historial 7845 items

Show 5 Page 1 of 1569

Figura 8. Nivelación de actividades.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8 muestra el módulo del acelerómetro, donde se observa una Tabla detallada del historial del acelerómetro. Esta Tabla integral para el monitoreo, presenta de manera ordenada y cronológica las lecturas del acelerómetro. Cada entrada en la Tabla representa un punto temporal, proporcionando a los usuarios una referencia clara de cómo las vibraciones mecánicas han evolucionado. Además, el diseño de la Tabla facilita la identificación de los valores de las coordenadas y eventos destacados en el historial, contribuyendo así, a un análisis más profundo.

Además de la Tabla del historial del acelerómetro, se tiene una Tabla que muestra a los usuarios del sistema, esta Tabla sirve como una herramienta central para la administración eficiente de cuentas. La Tabla presenta información clave sobre los usuarios registrados en el

En la Figura 9 se puede observar la consola en serie del entorno de desarrollo Arduino IDE, proporcionando una visión detallada de la conexión del ESP32. Esta herramienta es fundamental para el desarrollo y la depuración, mostrando mensajes y detalles importantes sobre la configuración y funcionamiento del microcontrolador durante la conexión, de esta manera, tener la certeza, que todo está funcionando correctamente en la conexión de los componentes físicos con la API y el Socket, para poder visualizar la información en tiempo real.

La notificación de advertencia relacionada con la actividad del acelerómetro, se realiza a través de una notificación de correo electrónico. Este mecanismo de notificación es esencial para alertar a los usuarios o administradores sobre posibles problemas o eventos inesperados relacionados con las vibraciones mecánicas. El contenido del correo electrónico proporciona detalles contextuales, permitiendo una respuesta rápida y adecuada a situaciones críticas.


```

Sketch_nov30a.ino
// ...Serial.begin(9600);
71 Wire.begin();
72 sensor.initialize();
73
74 // Verificar si el sensor MPU6050 se ha iniciado correctamente
75 if (sensor.testConnection()) Serial.println("Sensor iniciado correctamente");
76 else Serial.println("Error al iniciar el sensor");
77
Monitor Serie x

Mensaje (frito para mandar el mensaje de ESP32 Dev Module a COM5)

.....Conectado a WiFi
La IP asignada es: 192.168.3.144
Conexión exitosa con MPU-6050
Connecting to Socket.io...Accelerometro X: -1240 | Y: -7964
{"axa":0.075635394,"ay":0.486083984,"xz":1240,"yz":-7964}
Sending data to Socket.io server...
[INFO] send packet 42{"client":accelerometerData","axa":0.075635394,"ay":0.486083984,"xz":1240,"yz":-7964}
Respuesta de la API: {"success":true,"message":"Se ha guardado el dato del acelerometro","data":{"id":7906,"x":1240,"y":-7964,"x2":null}}
[INFO] disconnect
Accelerometro X: -1324 | Y: -7932
{"axa":0.080810547,"ayi":0.48130859,"xz":1324,"yz":-7932}
Sending data to Socket.io server...
[INFO] send packet 42{"client":accelerometerData","axa":0.080810547,"ayi":0.48130859,"xz":1324,"yz":-7932}
Respuesta de la API: {"success":true,"message":"Se ha guardado el dato del acelerometro","data":{"id":7907,"x":1324,"y":-7932,"x2":null}}
Accelerometro X: -1226 | Y: -8012
{"axa":0.07431192,"ayi":0.4803632,"xz":1226,"yz":-8012}
Sending data to Socket.io server...

```

*Figura 9. Consola en serie de la conexión del ESP32 en Arduino IDE.
Fuente: Elaboración propia.*

Por otro lado, el sistema de monitoreo y graficación de los datos, se puede observar en la Figura 10, en la cual se muestra tanto el total de registros, como los valores en las coordenadas X e Y, en los valores mínimos, máximos y medias, así como el acelerómetro en tiempo real y las coordenadas del RMS en X e Y con la finalidad de monitorear las vibraciones mecánicas de manera eficiente y clara.

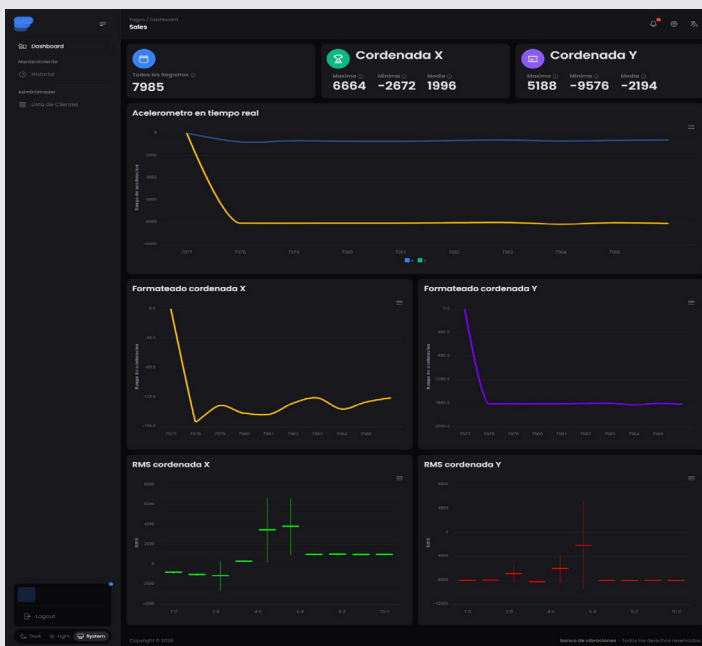


Figura 10. Monitoreo y graficación de datos.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación de la aplicación web adaptativa para la monitorización, interpretación y graficación de datos en tiempo real de un banco de vibraciones mecánicas, ha tenido un proceso metodológico que permitió asegurar la calidad de la aplicación. Durante el desarrollo del proyecto, se buscó abordar la necesidad de monitorear de manera constante el comportamiento de sistemas mecánicos, destacando la importancia de la interpretación eficiente de datos vibratorios.

La aplicación web, construida sobre tecnologías modernas como React para el frontend, Node.js para la API, PostgreSQL para la base de datos, y Socket.io para la comunicación en tiempo real, ha sido un reto muy importante en este proyecto ya que son tecnologías relativamente nuevas en la industria, sin embargo, se observa que son herramientas poderosas y adaptables.

La interfaz interactiva y accesible de la aplicación web, permite a los usuarios visualizar de manera efectiva las vibraciones en tiempo real, facilitando la comprensión y análisis de los datos generados por el prototipo mecánico.

La implementación y el uso de un sensor MPU6050 y un ESP32 para la captura y transmisión de datos, ha validado la viabilidad de la aplicación en un entorno experimental, ya que con tan pocos sensores se pudo llegar a medir, además de otros, muchos datos de vibración, de esta forma, se pudo sacar el máximo provecho para poder hacer prevenciones en los mantenimientos.

Este proyecto contribuye al avance del conocimiento dentro del área de las vibraciones mecánicas, así como también a la esfera tecnológica, ya que la aplicación web proporciona una solución práctica y eficiente para la recolección y análisis de datos, beneficiando además de esta manera, a estudiantes y profesionales interesados en conocer y comprender la forma en cómo se comportan los sistemas mecánicos en tiempo real.

Para la implementación del proyecto a nivel práctico y la expansión de su uso, se considera la necesidad de adquirir un dominio y un servidor VPS, como Digital Ocean, esto con el propósito de alojar la API en un entorno de producción, lo que garantiza la disponibilidad y accesibilidad continua de la aplicación, así como también resalta la escalabilidad para operar esta solución dentro de la industria.

Este proyecto ha cumplido su propósito para el monitoreo y graficación de datos en tiempo real para un equipo rotatorio, pero, además, ha sentado las bases para futuras investigaciones y aplicaciones en el campo de las vibraciones mecánicas. Por lo que la combinación de la tecnología moderna con la experimentación práctica, ha resultado en una herramienta valiosa que, sin duda, contribuirá al conocimiento de las personas que hagan uso de la aplicación y la comprensión de los sistemas mecánicos en movimiento, con la ventaja de que se utilizaron tecnologías modernas para que no quede discontinuada en un corto plazo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Rodríguez-Gómez, D., Casto, D., y Meneses, J. (2018). Usos problemáticos de las TIC entre jóvenes en su vida personal y escolar. *Comunicar*, 26(56), 91-107. doi: <https://doi.org/10.3916/C56-2018-09>.

- [2] Otero, A., Rivera, W., Pedraza, C. y Canay, J. (2019). Tic para la educación: sistema adaptativo basado en mecanismos de aprendizaje automático para la apropiación de tecnologías en estudiantes de educación media. *Telos*, 21(3), 526-537. doi: <https://doi.org/10.36390/telos213.03>.
- [3] Cruz, M., Pozo, M., Aushay, H., y Arias, A. (2019). Las Tecnologías de la Información y de la Comunicación (TIC) como forma investigativa interdisciplinaria con un enfoque intercultural para el proceso de formación estudiantil. *E-Ciencia de la información*, 9(1), 44-59. doi: <https://doi.org/10.15517/eci.v1i1.33052>.
- [4] Belandria, G. (2019). El concepto de trabajo y las TIC. *Sapienza organizacional*, 6(12), 21-56.
- [5] Buenrostro, H., y Hernández, M. (2019). La incorporación de las TIC en las empresas. Factores de la brecha digital en las Mipymes de Aguascalientes. *Economía: teoría y práctica*, 50, 101-124. doi: <http://dx.doi.org/10.24275/ETYP/AM/NE/502019/Buenrostro>.
- [6] Pacheco, D., y Rodríguez, R. (2019). Las TIC como estrategia competitiva en la gestión empresarial. *Enfoque*, 3(12), 286-298.
- [7] Ibarra, M., Eusebio, R., y Julio, L. (2023). Red neuronal convencional para la clasificación de piezas mecánicas usando un sistema de visión artificial. *Ingeniantes*, 2(2), 67-72.
- [8] Viveros, I., Muñoz, J., y Aguirre, J. (2021). Diseño de sistema de análisis de vibraciones por adquisición de datos con interfaz gráfica. *INNO-DOCT 2021*. 561-568. Editorial Universitat Politècnica de València. doi: <http://dx.doi.org/10.4995/INN2021.2021.13432>.
- [9] Maigua, C., Quitiaquez, W., Simbaña, I., y Quitiaquez, R., Toapanta, L., y Isaza-Roldan, C. (2020). Diseño de un sistema de monitoreo de vibraciones mecánicas en generadores hidroeléctricos de media potencia. *Técnica energía*, 17(1), 92-102. doi: [10.37116/revistaenergia.v17.n1.2020.397](https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v17.n1.2020.397).
- [10] Flores, E., Albornoz, A., López, E., y Romero, J. (2020). Evaluación mediante vibraciones de los rodamientos de la transmisión de un prototipo mini Baja SAE. *Ingeniería UC*, 27(1), 41-53.
- [11] Dinardo, G., Fabbiano, L., y Vacca, G. (2018). A smart and intuitive machine condition monitoring in the Industry 4.0 scenario. *Measurement*, 126, 1-12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.041>
- [12] Camargo-Amado, R., Mosquera-Ayala, A. (2023). La revolución industrial 4.0. *Ingeniería y competitividad*, 25(2), 1-2. doi: <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i2.13294>.
- [13] ElectronicWings (14 noviembre, 2024). MPU6050 Gyroscope Interfacing with ESP32. [En línea]. Disponible: <https://www.electronicwings.com/esp32/mpu6050-gyroscope-interfacing-with-esp32>.
- [14] React (14 noviembre, 2024). React, la biblioteca para interfaces de usuario web y nativas. [En línea]. Disponible: <https://es.react.dev/>.
- [15] Ochoa, A., Cangrejo L. y Delgado, T. (2018). Alternativa Open Source en la implementación de un sistema IoT para la medición de la calidad del aire. *Revista cubana de ciencias informáticas*, 12(1), 189-204.
- [16] Timarán-Pereira, R., Chaves-Torres, A. y Ordoñez-Erazo, H. (2023). Decision Tree Algorithm Moderately Coupled to PostgreSQL DBMS. *Revista Facultad de Ingeniería*, 32(66), 1-17. doi: <https://doi.org/10.19053/01211129.v32.n66.2023.16777>.





Ciencias *de la* Computación

Ingeniantes

Modelo de Procesos Logísticos en agencias aduanales usando Herramientas de Ingeniería de Software

RESUMEN: En el presente estudio que tiene como objetivo plantear la creación de un modelo de optimización mediante la aplicación de principios de uso de herramientas de ISW, con el fin de mejorar continuamente los procesos aduaneros eligiendo e implementando sistemas tecnológicos efectivos y estructurados sigue un diseño de investigación explicativo, el cual se centra en la relación entre causa y efecto y en las preocupaciones sobre cómo una variable afecta o es responsable de otra variable. Se limita las variables relacionadas con los procesos aduaneros y susceptibles de optimización a través de herramientas de ISW, como la gestión de inventario, el seguimiento de envíos, la gestión de documentos aduaneros, etc.; se utilizaron fuentes de datos específicas y disponibles para la agencia aduanal, como registros internos de la empresa, bases de datos existentes y sistemas de seguimiento de envíos; se hace énfasis en un periodo de tiempo específico para evaluar la efectividad del modelo de optimización de procesos lógicos, de un aproximado de un año y medio; se utiliza el modelo de ciclo de vida de software en cascada para desarrollar el proyecto y al final se presentan las conclusiones relacionadas a partir de los resultados obtenidos, incluyéndose, además, recomendaciones para la agencia aduanal.

PALABRAS CLAVE: Agencias aduanales, Herramientas de ingeniería de software, Modelo, Optimización logística.



Colaboración

Javier Guzmán Obando; Rocío Estela Reyna Rodríguez; Nora Hilda González Durán; Juan Carlos Guzmán García, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Fecha de recepción: 04 de junio de 2024

Fecha de aceptación: 29 de octubre de 2024

ABSTRACT: In this study, which aims to propose the creation of an optimization model through the application of principles of using ISW tools, in order to continuously improve customs processes by choosing and implementing effective and structured technological systems, an explanatory research design is followed, which focuses on the relationship between cause and effect and on concerns about how one variable affects or is responsible for another variable. It limits the variables related to customs processes and susceptible to optimization through ISW tools, such as inventory management, shipment tracking, customs document management, etc.; specific and available data sources for the customs agency were used, such as internal company records, existing databases and shipment tracking systems; emphasis is placed on a specific time period to evaluate the effectiveness of the logical process optimization model, approximately one and a half years; The waterfall software life cycle model is used to develop the project and, at the end, the conclusions related to the results obtained are presented, including, in addition, recommendations for the customs agency.

KEYWORDS: Customs agencies, Logistics optimization, Model, Software engineering tools.

INTRODUCCIÓN

Una agencia aduanal es una empresa que actúa como intermediario entre los importadores/exportadores y las autoridades aduaneras. Su función principal es facilitar el comercio internacional asegurando que las mercancías que entran o salen de un país cumplan con todas las regulaciones y procedimientos aduaneros [1]. Las agencias aduanales son fundamentales en el comercio internacional, manejando la importación y exportación de las mercancías; estas se encuentran sometidas a dificultades operativas y legales, donde la falta de mejora en sus procedimientos puede conducir a demoras y una disminución en su ventaja en la competencia.

Con la globalización, estas agencias son vitales para las empresas que buscan expandirse de manera internacionalmente, pero enfrentan desafíos significativos en términos de procesos, fiscalidad y logística.

Las restricciones ambientales más severas de la actualidad, la mayor atención hacia la sostenibilidad, los crecientes volúmenes de transporte y la necesidad apremiante de digitalizar las transacciones exigen una mayor eficiencia portuaria para mejorar los procesos en las agencias aduanales de los puertos marítimos [2, 3, 4]. Con este objetivo, los volúmenes de datos más amplios que se generan actualmente requieren cada vez más el apoyo de la analítica empresarial para una toma de decisiones más oportuna y basada en hechos.

Por otro lado, las herramientas de ingeniería de software (ISW) son programas que ayudan a los desarrolladores a crear, mantener y gestionar software de manera eficiente. Estas herramientas abarcan una amplia gama de funcionalidades, desde editores de código y entornos de desarrollo integrados hasta herramientas de control de versiones, prueba y despliegue. Uno de los beneficios clave de las herramientas de ingeniería de software es la mejora de la productividad [5].

En este sentido, la integración de los sistemas de inteligencia empresarial con los sistemas de información de procesos puede convertirse en una herramienta clave para los usuarios empresariales en la toma de decisiones [6].

Las empresas informan continuamente de mayores ganancias de valor competitivo derivadas del uso de herramientas de inteligencia empresarial y analítica [7].

Nuevas tendencias como el análisis rápido y la ciencia de datos han surgido como parte de la inteligencia empresarial [8].

Las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) y las herramientas de Ingeniería de Software (ISW) antes mencionadas, entre otras, son clave para mejorar y optimizar los procesos de las agencias aduaneras, ofreciendo soluciones tecnológicas personalizadas que mejoran la gestión, eficiencia y operatividad.

En el presente estudio, se explorará cómo estas herramientas pueden ayudar a las agencias aduaneras a superar sus desafíos, incrementar la eficiencia, mejorar la calidad de los servicios y garantizar el cumplimiento de las regulaciones, siendo fundamentales para el éxito en el comercio internacional.

En el mundo globalizado de hoy, la logística se ha convertido en un factor clave para facilitar el comercio in-

ternacional y un actor importante en el desarrollo económico. Para aumentar el rendimiento empresarial, los buenos resultados logísticos requieren un compromiso entre el requisito de reducir los niveles totales de inventario en la cadena de suministro y los plazos de entrega, al tiempo que se aprovechan las economías de escala y se aumenta el servicio al cliente [9].

El principal objetivo de la gestión logística es planificar, implementar y controlar el flujo y el almacenamiento de bienes, servicios e información entre los puntos de origen y los lugares de uso en las actividades de la cadena de suministro para satisfacer las necesidades de los clientes de forma rápida y eficiente.

La automatización se promueve como uno de los factores que han demostrado mejorar la competencia logística y, al mismo tiempo, reducir los costos operativos [10]. Como tal, las nuevas tecnologías adoptadas en los departamentos de aduanas han ayudado a hacer que el trabajo logístico sea más fácil y mejor en el proceso de mejorar la prestación del servicio.

La adopción de nuevas tecnologías se refiere a un conjunto de técnicas productivas que ofrecen una mejora significativa, ya sea medida en términos de aumento de la producción o ahorro de costos en comparación con la tecnología establecida para un proceso determinado en un contexto histórico específico [11]. En este estudio, el enfoque se centra en el uso de herramientas de ISW para lograr este cometido; para ello, se plantea la creación de un modelo de optimización mediante la aplicación de principios de uso de herramientas de ISW, con el fin de incrementar la productividad y disminuir los gastos operativos, eligiendo e implementando sistemas tecnológicos efectivos y estructurados. Además, se pretende identificar y analizar las variables logísticas relevantes para el estudio de los procesos logísticos de una agencia aduanal, con un enfoque en las herramientas de ISW, así como desarrollar un plan de evaluación de la optimización de los procesos logísticos, que incluya indicadores clave de rendimiento.

Por lo anterior, este estudio, supone que el desarrollo de un modelo de optimización de procesos logísticos, basado en herramientas de ingeniería de software, contribuirá de manera favorable a la gestión de las operaciones de una agencia aduanal internacional.

MATERIAL Y MÉTODOS

En [12] se define el diseño de investigación como “el proceso de establecer parámetros para la recopilación y el procesamiento de datos con el objetivo de incorporar la relevancia para los fines de la investigación”. El diseño de investigación, es el plan y la estructura de una investigación para responder a las preguntas de investigación [13].

El presente estudio que tiene como objetivo plantear la creación de un modelo de optimización mediante la aplicación de principios de uso de herramientas de ISW, con el fin de mejorar los procesos logísticos, eligiendo e implementando sistemas tecnológicos efectivos y estructurados sigue un diseño de investigación explicativo, el cual se centra en la relación entre causa y efecto y en las preocupaciones sobre cómo una variable afecta o es responsable de otra variable. Los proyectos de investigación explicativos van más allá de la descripción y tratan de explicar las causas del fenómeno.

Para lo anterior, en primer lugar, se limitarán las variables relacionadas con los procesos aduaneros y susceptibles de optimización a través de herramientas de ISW, como la gestión de inventario, el seguimiento de envíos, la gestión de documentos aduaneros, etc.

En segundo lugar, se utilizarán fuentes de datos específicas y disponibles para la agencia aduanal, como registros internos de la empresa, bases de datos existentes y sistemas de seguimiento de envíos.

En tercer lugar, se hará énfasis en un periodo de tiempo específico para evaluar la efectividad del modelo de optimización de procesos lógicos, de un aproximado de un año y medio.

Por último, las métricas para evaluar la efectividad del modelo de optimización se centrarán en indicadores clave de rendimiento específicos, como el tiempo de descarga, la precisión en la clasificación de productos, la eficiencia en el seguimiento de re-expedición, etc.

De acuerdo al modelo propuesto, y para observar resultados parciales del modelo propuesto, se utiliza la herramienta "Power BI", que consiste en un conjunto de herramientas de visualización y análisis de datos de negocios creada por Microsoft; la cual permite a las empresas conectarse a una variedad de fuentes de datos, transformar esos datos en información útil y visualizarlos de manera interactiva. Los informes y los paneles interactivos de Power BI ayudan a las empresas a la toma de decisiones y a comprender mejor sus datos.

El método de investigación que se emplea es la adaptación del modelo en cascada dentro del proceso de desarrollo de software. Siguiendo un orden específico de etapas de forma lineal, las cuales son: Preanálisis, Análisis, Diseño, Desarrollo, Pruebas, Implantación y Mantenimiento; estas fases suceden de manera secuencial y lineal, una detrás de la otra. De esta forma, cada fase debe completarse antes de poder avanzar a la siguiente, siguiendo un progreso paso a paso, como se presenta en la Figura 1 [14].

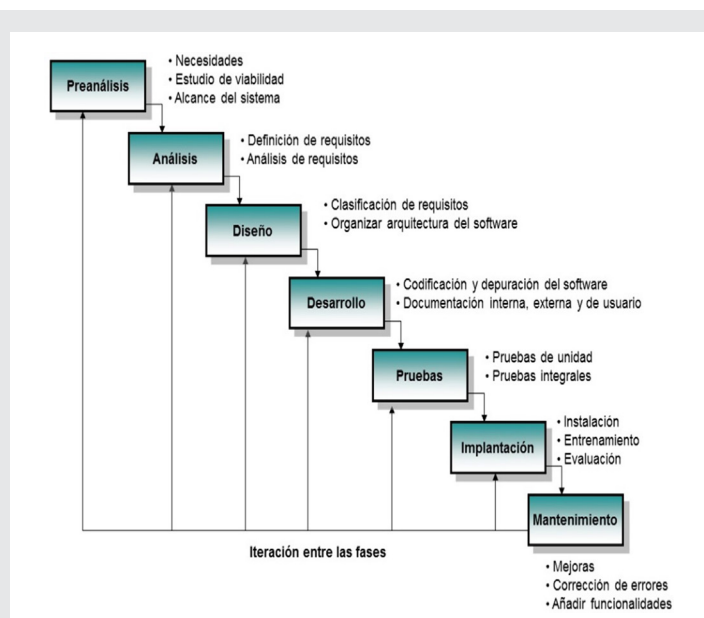


Figura 1. Modelo en Cascada.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

El modelo propuesto para la mejora de los procesos en la Agencia Aduanal se presenta en la Figura 2.



Figura 2. Modelo de optimización de procesos propuesto.

Fuente: Elaboración propia.

Componentes del Modelo:

1. Análisis de Procesos Aduanales:

- **Mapeo de Procesos:** Utilización de herramientas BPMN (Business Process Model and Notation) de modelamiento y simulación de procesos que sirvan para documentar y analizar los procesos aduanales, identificando cuellos de botella, redundancias y oportunidades de mejora.
- **Análisis de la Legislación:** Desarrollo de un sistema experto o base de datos que contenga la legislación aduanera actualizada y permita a los stakeholders acceder rápidamente a la información relevante para cada trámite.
- **Análisis de Riesgos:** Implementación de herramientas de análisis de riesgos para identificar posibles problemas en los procesos aduanales, como demoras, errores en la documentación o incumplimiento de la normativa.

2. Diseño e Implementación de Soluciones:

- Sistema de Gestión Aduanal: Desarrollo de un sistema de gestión aduanal que automatice tareas como la clasificación arancelaria, el cálculo de impuestos y la generación de documentos.
- Plataforma de Comunicación: Creación de una plataforma online para facilitar la comunicación entre la agencia aduanal, los clientes y las autoridades aduaneras.
- Integración con Sistemas Externos: Integración del sistema de gestión aduanal con los sistemas de las autoridades aduaneras, los clientes y otros actores relevantes en el proceso logístico.

3. Monitoreo y Optimización Continua:

- Dashboards: Desarrollo de dashboards para visualizar KPIs, como el tiempo de despacho de mercancías, el costo de los trámites y el nivel de cumplimiento de la normativa.
- Business Intelligence: Implementación de herramientas de Business Intelligence para analizar datos históricos, identificar tendencias y patrones, y tomar decisiones informadas.
- Machine Learning: Utilizar algoritmos de Machine Learning para predecir la demanda de servicios aduanales, optimizar la asignación de recursos y mejorar la eficiencia de los procesos.

Se proporciona una visión detallada de cómo se han visto afectados los procesos, destacando cualquier mejora significativa y los desafíos identificados. Además, se analizan los indicadores clave de rendimiento que reflejan el impacto en la gestión de procesos en su conjunto. Se puede observar cómo la realización del modelo de optimización ha afectado directamente a la eficiencia en la realización de tareas logísticas.

Calidad del software

Se exploran los resultados relacionados con la eficacia y eficiencia de los procesos logísticos de la agencia aduanal después de la realización del modelo de optimización basado en una de las herramientas de ISW Power BI. Que corresponde al Monitoreo y Optimización Continua, presentado en la Figura 2, mediante el cual se permite visualizar indicadores clave de rendimiento (KPI) y monitorear el desempeño del proceso. Este apartado proporciona una visión detallada de cómo se han visto afectados los procesos, destacando cualquier mejora significativa y los desafíos identificados. Además, se analizan los indicadores clave de rendimiento que reflejan el impacto en la gestión de procesos en su conjunto.

En el análisis de la imagen de la plataforma Excel y la de Power Bi, que corresponden a la Figura 3 y 4, los resultados revelan aspectos clave. La tendencia hacia la adquisición de modelos más grandes y eficientes en términos de unidades indica una búsqueda de soluciones que satisfagan las necesidades sin que tengan que adquirir múltiples dispositivos. La distribución mayoritaria de modelos con tonelaje completo sugiere una preferencia por soluciones

que garantizan una distribución eficiente y económica de productos. En cuanto al tipo de unidad, la inclinación hacia modelos con tonelaje completo refuerza la búsqueda de eficiencia y economía por parte de empresas y consumidores.

Las visualizaciones ofrecen una visión clara de las áreas problemáticas, proporcionando una base sólida para implementar mejoras y optimizar la calidad general del software.

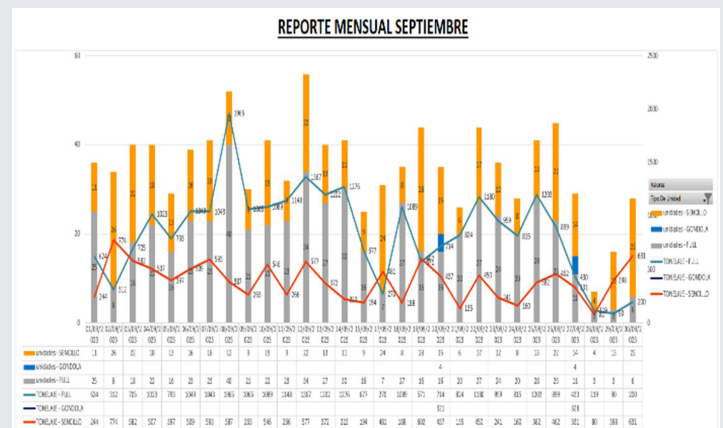


Figura 3. Reporte mensual del mes de septiembre en la herramienta "Microsoft Excel".

Fuente: Elaboración propia con herramienta de ISW.

Precisión de los datos

Se centra en la confiabilidad de la información proporcionada por el software de optimización. Se comparan los resultados generados por el sistema con los datos de entrada esperados, y se analiza la discrepancia entre ellos. Esta sección proporciona información crítica sobre la calidad de los datos y su integridad, lo que tiene un impacto significativo en la toma de decisiones y la gestión de procesos.

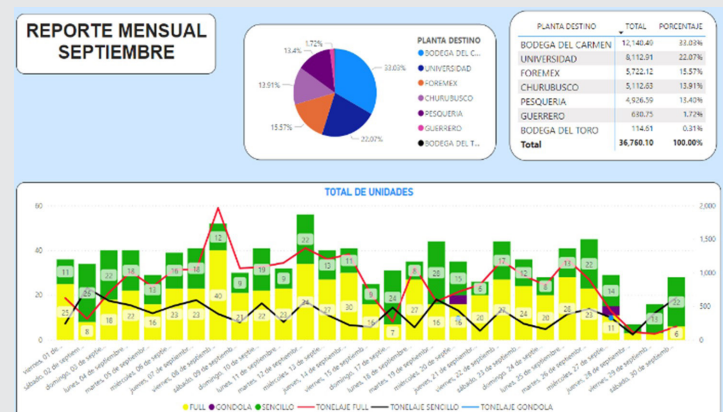


Figura 4. Reporte mensual del mes de septiembre en la herramienta "Power Bi".

Fuente: Elaboración propia con herramienta de ISW.

La documentación refleja una compilación crucial de información para la gestión eficiente de sus operaciones. La precisión de los datos en la documentación, como se

evidencia en el inventario actualizado, el resumen diario y el registro de remanente y días libres, es esencial para la toma de decisiones precisas. Un inventario preciso garantiza que los recursos estén adecuadamente gestionados, mientras que el resumen diario ofrece una visión clara de las actividades operativas. La representación visual del remanente y los días libres, basada en datos precisos, facilita una planificación efectiva. La precisión en estos detalles es fundamental para mantener la eficiencia operativa, asegurando que las decisiones se tomen sobre una base confiable y contribuyan al rendimiento óptimo del barco "LADY SERRA". Todo ello se puede observar en las Figuras 5, 6, 7 y 8.

Tabla1. Documentación del Barco "LADY SERRA".

Planta	Código de provisión	Capacit	Ancho Cont	Peso Rpt	PLANTA DESTINO	FECHA DE CARGA	LÍNEA TRANSPORTISTA	PLACA TRACTOR	PLACA MOVIL	TIPO DE UNID.
Universidad	2783561	0.88	915	15.930	UNIVERSIDAD	16/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	56A5Y	95UJST	FULL
Universidad	2783611	0.88	915	16.040	JUVENTUD	09/11/2023	EQUIPAMIENTO ZUTRELE SA DE CV	71ANCM	25UJST	FULL
Universidad	2804801	0.88	915	16.380	UNIVERSIDAD	16/11/2023	EQUIPAMIENTO ZUTRELE SA DE CV	71ANCM	95UJST	FULL
Universidad	2804811	0.88	915	16.380	UNIVERSIDAD	16/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	70ATV	229NVT	FULL
Universidad	2804901	0.88	915	16.380	UNIVERSIDAD	22/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	69ATV	95UJST	FULL
Universidad	2804911	0.88	915	16.070	UNIVERSIDAD	22/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	90ABAM	23UKOC	FULL
Universidad	2804921	0.88	915	15.990	UNIVERSIDAD	16/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	89ABAM	23UKOC	FULL
Universidad	2804931	0.88	915	16.380	UNIVERSIDAD	16/11/2023	AUTO LINEAS NACIONALES SA DE CV	03AMSH	7270TS	SENCILLO
Universidad	2804941	0.88	915	16.090	UNIVERSIDAD	16/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	44BWS	39UJST	FULL
Universidad	2804951	0.88	915	16.090	UNIVERSIDAD	16/11/2023	RIC EXPRESS SA DE CV	85BIA	02UJST	SENCILLO
Universidad	2804961	0.88	915	15.500	UNIVERSIDAD	22/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	89ABAM	410WGS	FULL
Universidad	2804971	0.88	915	15.510	UNIVERSIDAD	16/11/2023	FLUETES SA DE CV	20ATV	28UJST	SENCILLO
Universidad	2804981	0.88	915	15.430	UNIVERSIDAD	22/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	70ATV	24UKAC	FULL
Universidad	2804991	0.88	915	16.080	UNIVERSIDAD	16/11/2023	EQUIPAMIENTO ZUTRELE SA DE CV	44APF	56UJST	FULL
Universidad	2805001	0.88	915	16.370	UNIVERSIDAD	16/11/2023	EQUIPAMIENTO ZUTRELE SA DE CV	71ANCM	95UJST	FULL
Universidad	2805011	0.88	915	16.090	UNIVERSIDAD	16/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	56A5Y	98UJST	FULL
Universidad	2805021	0.88	915	15.510	UNIVERSIDAD	16/11/2023	RIC EXPRESS SA DE CV	85BIA	32UMBY	SENCILLO
Universidad	2805031	0.88	915	16.320	JUVENTUD	09/11/2023	EQUIPAMIENTO ZUTRELE SA DE CV	71ANCM	68UJST	FULL
Universidad	2805041	0.88	915	16.380	UNIVERSIDAD	22/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	89ABAM	443WGS	FULL
Universidad	2805051	0.88	915	16.320	UNIVERSIDAD	16/11/2023	FLUETES SA DE CV	37ATX	58UJST	SENCILLO
Universidad	2805061	0.88	915	16.380	UNIVERSIDAD	16/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	90ABAM	440WGS	FULL
Universidad	2805071	0.88	915	16.320	UNIVERSIDAD	16/11/2023	AUTO LINEAS NACIONALES SA DE CV	03AMSH	7270TS	SENCILLO
Universidad	2805081	0.88	915	16.380	UNIVERSIDAD	16/11/2023	FLUETES SA DE CV	20ATV	28UJST	SENCILLO
Universidad	2805091	0.88	915	15.870	UNIVERSIDAD	16/11/2023	EQUIPAMIENTO ZUTRELE SA DE CV	44APF	55UJST	FULL
Universidad	2805101	0.88	915	16.090	UNIVERSIDAD	22/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	56A5Y	99UJST	FULL
Universidad	2805111	0.88	915	16.380	UNIVERSIDAD	22/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	44BWS	32UJST	FULL
Universidad	2805121	0.88	915	16.040	UNIVERSIDAD	16/11/2023	EQUIPAMIENTO ZUTRELE SA DE CV	44APF	25UJST	FULL
Universidad	2805131	0.88	915	16.090	UNIVERSIDAD	16/11/2023	ESPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS	90ABAM	440WGS	FULL

Fuente: Elaboración propia con herramienta de ISW.

Tabla2. Inventario actualizado del Barco "LADY SERRA".

B/M "LADY SERRA"				DESCARGADO		REEXPEDIDO		EN PUERTO	
Pedimento	Producto	Ancho	Espeor	TONELAJE	BULTOS	TONELAJE	BULTOS	TONELAJE	BULTOS
300092	ROLLOS FRIOS	915	0.88	1,228,252	80	648,111	42	580,141	38
			0.53	95,840	6	95,840	6	0	0
			1.19	370,440	24	0	0	370,440	24
			0.73	192,530	14	192,530	14	0	0
			0.44	1,860,090	112	1,860,090	112	0	0
			0.53	565,410	33	565,410	33	0	0
			0.76	295,840	15	0	0	295,840	15
			0.77	557,773	30	557,773	30	0	0
			1.21	714,235	39	714,235	39	0	0
			1.52	114,861	7	114,861	7	0	0
		1221	0.91	281,535	15	281,535	15	0	0
			0.54	387,940	23	387,940	23	0	0
			0.76	964,035	53	900,415	43	163,620	10
			0.45	298,120	20	167,450	12	130,670	8
			1.92	383,235	24	383,235	24	0	0
			1.21	297,620	19	0	0	297,620	19
			1.18	96,530	6	96,530	6	0	0
			1.53	188,752	12	0	0	188,752	12
			1.90	196,880	10	0	0	196,880	10
			0.46	2,009,490	110	2,009,490	110	0	0
		916	0.46	1,196,230	67	1,196,230	67	0	0
			0.75	196,390	10	0	0	196,390	10
			0.76	203,190	14	203,190	14	0	0
			0.53	248,970	21	248,970	21	0	0
			Total general			12,908,188	764	10,523,835	618
								2,384,353	146

Fuente: Elaboración propia con herramienta de ISW.

Tabla 3. Resumen del día del Barco "LADY SERRA".

REEXPEDICION - MV LADY SERRA- PUERTO TAMPICO-ROLLOS										
Total 20/11/2023									559441	38
21/11/2023	UNIVERSIDAD	TRANSPORTES Y MANIOBRAS ESPECIALIZADAS SA DE CV	148844	30UJST	915	0.88	16090	1		
				32UJST	915	0.88	16190	1		
				56A5Y	99UJST	915	0.88	16090	1	
				00UJST	915	0.88	16230	1		
				69ATV	98UJST	915	0.88	16190	1	
				95UJST	915	0.88	16180	1		
				70ATV	229NVT	915	0.88	16180	1	
				24UKAC	915	0.88	15430	1		
				44UJST	915	0.88	16180	1		
				44UJST	915	0.88	15590	1		
				33UKOC	915	0.88	16070	1		
				35UKOC	915	0.88	15950	1		
Total 21/11/2023									191630	12
Total general									10523835	618

Fuente: Elaboración propia con herramienta de ISW.

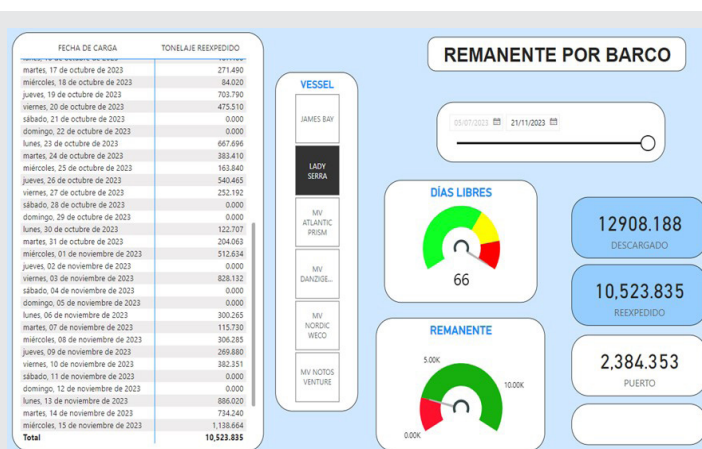


Figura 5. Remanente y días libres del Barco "LADY SERRA".

Fuente: Elaboración propia con herramienta de ISW.

Eficiencia del software

Se evalúa la capacidad del sistema para realizar tareas de manera rápida y eficiente, utilizando eficazmente los recursos disponibles. Se presentan métricas que reflejan la eficiencia del software en términos de tiempo y recursos utilizados. Además, se discute cómo la realización del modelo de optimización ha afectado directamente a la eficiencia en la realización de tareas logísticas.

La visualización de los resultados de la reexpedición del puerto de Altamira y Tampico, que ocurrió el martes 21 de noviembre del presente año, revela un aforo de unidades de 31.68, con una capacidad máxima de 191.63 unidades, y una cantidad total de 12; como se puede observar en la Figura 9.

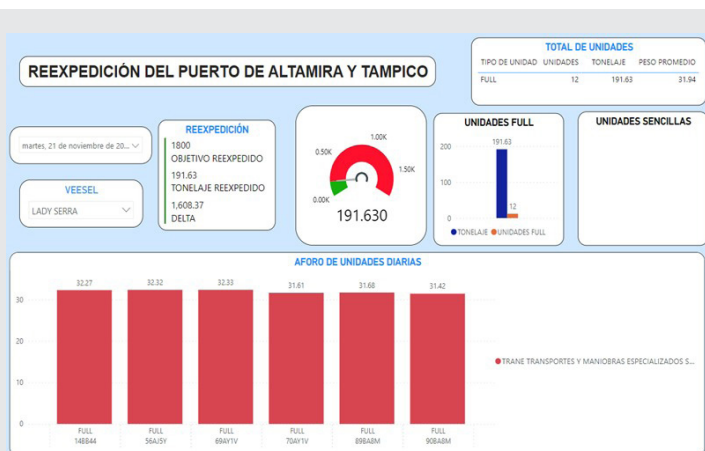


Figura 6. Reexpedición del Barco "LADY SERRA", del día 21 de noviembre del 2023.

Fuente: Elaboración propia con herramienta de ISW.

La reexpedición tuvo lugar en tres etapas, y el aforo de unidades diarias se mantuvo estable a lo largo de estas etapas, indicando una ejecución eficiente sin pérdidas significativas de carga. El peso promedio de las unidades reexpedidas fue de 31.94 toneladas, lo que demuestra una distribución adecuada del peso entre las unidades involucradas en la reexpedición.

En términos de capacidad de carga, la reexpedición resultó exitosa, destacando la eficiencia del puerto de Altamira y Tampico en el manejo de este proceso.

Satisfacción de Usuario

Se adentra en la percepción de los usuarios, tanto internos como externos, en relación con la usabilidad y utilidad del software de optimización. Aquí, se presentarán y analizarán los comentarios y retroalimentación recopilados de los usuarios, lo que proporcionará una profunda comprensión de su satisfacción. Se examina si el software ha cumplido con las expectativas y cómo esto influye en la satisfacción general.

El primer modelo de reexpedición (ver Figura 10), ofrecía una perspectiva general de las unidades diarias reexpedidas, mientras que el segundo más detallado con las unidades involucradas, proporcionando información específica sobre la distribución de unidades full y sencillas.



Figura 7. Primer modelo de la reexpedición del barco "MV ATLANTIC PRISM".

Fuente: Elaboración propia con herramienta de ISW.

La atención de estos detalles es fundamental para evaluar la eficiencia y el éxito de la reexpedición en términos de satisfacción del usuario, ya que la correcta distribución de unidades y el cumplimiento de la capacidad diaria pueden influir directamente en la experiencia general.



Figura 8. Segundo modelo más detallado de la reexpedición del barco "MV ATLANTIC PRISM".

Fuente: Elaboración propia con herramienta de ISW.

CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación se ha dedicado de manera integral a explorar y abordar los desafíos asociados con la optimización de procesos logísticos en el ámbito de una agencia aduanal internacional, se destacó la complejidad para estos procesos, de manera relevante la necesidad de soluciones eficientes y adaptativas.

Se enfocó en identificar y resolver los retos relacionados con la mejora de los procesos logísticos dentro de las agencias aduanales, relevando la necesidad de soluciones eficientes y adaptativas. Utilizando las herramientas de ingeniería de software para modernizar los procesos logísticos de las agencias aduaneras representa una estrategia esencial para avanzar en la eficiencia, exactitud en la información y experiencia del cliente, mientras se contabiliza una reducción en los gastos operativos y se resuelven los problemas logísticos asociados con las transacciones internacionales y las normativas aplicables.

La aplicación en base a las herramientas de ingeniería de software, tomó un enfoque estratégico para mejorar la eficiencia y la calidad en la gestión de operaciones aduanales.

La recopilación y el análisis de los datos, que fueron respaldados por la metodología seleccionada, proporcionaron una comprensión profunda de los factores que influyen en los procesos logísticos, permitiendo identificar áreas de mejora.

Se resaltó la importancia de considerar la calidad de software, la precisión de los datos, la eficiencia del software y la satisfacción del usuario como variables críticas en la evaluación del modelo de optimización, ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones informadas en el ámbito de la agencia aduanal.

Recomendaciones

En base a los resultados y aprendizajes derivados de este estudio sobre la optimización de procesos logísticos en una agencia aduanal internacional mediante herramientas de ingeniería de software, se formulan las siguientes recomendaciones, para una gestión logística eficiente y alineada con las demandas del comercio internacional.

a) Implementación Gradual: Se sugiere que la implementación de herramientas de ingeniería de software se realiza de manera sucesiva y continua, comenzando por áreas específicas de la agencia aduanal, permitiendo una adaptación progresiva y una evaluación continua de los impactos.

b) Capacitación Continua: Dada la naturaleza tecnológica de las herramientas de ingeniería de software, se recomienda un programa continuo de capacitación para el personal de la agencia. Esto asegurará un aprovechamiento óptimo de las herramientas y facilitará la adopción de nuevas prácticas.

c) Monitoreo de Indicadores: La agencia aduanal debe establecer un sistema de monitoreo constante de los indicadores clave de rendimiento identificados durante la investigación. Este seguimiento permitirá evaluar de manera efectiva el impacto de las mejoras implementadas.

d) Adaptabilidad y actualización: Dado el entorno dinámico del comercio internacional, se recomienda que la agencia aduanal mantenga una postura de adaptabilidad y esté abierta a actualizar sus herramientas de software de acuerdo con las evoluciones tecnológicas.

e) Comunicación Eficaz: Fomentar un canal de retroalimentación abierto con los stakeholders de la agencia aduanal, que permitan una comunicación eficiente entre la agencia aduanal, los clientes y las autoridades aduaneras.

f) Digitalización de Documentos: Implementar un sistema de gestión documental para digitalizar y almacenar la documentación aduanera, facilitando su acceso y reduciendo el uso de papel.

g) Automatización de Tareas: Automatizar tareas repetitivas, como la captura de datos, la generación de informes y el envío de notificaciones.

h) Gestión de Riesgos: Implementar un sistema de gestión de riesgos para identificar, evaluar y mitigar los riesgos asociados a los procesos aduanales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Real, Óscar Bernardo Reyes. *Manual de derecho aduanero*. Oxford University Press, 2015.

[2] Heilig, L.; Vob, S. *Inter-terminal transportation: An annotated bibliography and research agenda*. *Flex. Serv. Manuf. J.* 2017, 29, 35-63.

[3] Meersman, H.; van de Voorde, E.; Vanelslender, T. *Port competitiveness now and in the future: What are the issues and challenges?* *Res. Transp. Bus. Manag.* 2016, 19, 1-3.

[4] Lee, P.T.-W.; Kwon, O.K.; Ruan, X. *Sustainability challenges in maritime transport and logistics industry and its way ahead*. *Sustainability* 2019, 11, 1331.

[5] Yang, Yanming, et al. *A survey on deep learning for software engineering*. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2022, vol. 54, no 10s, p. 1-73.

[6] Vera-Baquero, A.; Colomo-Palacios, R.; Molloy, O. *Real-time business activity monitoring and analysis of process performance on big-data domains*. *Telemat. Inform.* 2016, 33, 793-807.

[7] Bozic, K.; Dimovski, V. *Business intelligence and analytics for value creation: The role of absorptive capacity*. *Int. J. Inf. Manag.* 2019, 46, 93-103.

[8] Larson, D.; Chang, V. *A review and future direction of agile, business intelligence, analytics and data science*. *Int. J. Inf. Manag.* 2016, 36, 700-710.

[9] Sahay, B. S., & Mohan, R. *3PL practices: an Indian perspective*. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 36(9), 666-689. 2006.

[10] Gudehus, T., & Kotzab, H. *Planning and scheduling production systems from a logistics perspective*. *Logistics Research*, 1, 163-172. 2009.

[11] Adams, E., Goodale, W., Burns, S., Dorr, C., Duron, M., Gilbert, A., ... & Robinson, M. *Stereo-Optic High-Definition Imaging: A New Technology to Understand Bird and Bat Avoidance of Wind Turbines (No. DOE-BRI072117)*. *Biodiversity Research Institute*. 2017.

[12] Kothari, C. R. *Research methodology: Methods and techniques*. *New Age International*. 2004.

[13] Cooper, D., & Schindler, P. (2008). *Business Research Methods (10th ed.)*. New York, NY: McGraw Hill. 2008.

[14] Pargaonkar, Shravan. *A Comprehensive Research Analysis of Software Development Life Cycle (SDLC) Agile & Waterfall Model Advantages, Disadvantages, and Application Suitability in Software Quality Engineering*. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 2023, vol. 13, no 08, p. 345-358

Ingeniantes®