



Ingeniantes®

Año 13, No.1, 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

Año 13 / No. 1 / Vol. 13

Información Legal

Ingeniantes, Año 13, No. 1, Vol. 13, julio 2026 - diciembre 2026 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 junio de 2026.

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 en jefe
Dr. José Luis Marín Muñiz
Coeditor
Lic. Erik Balderas González

Administración

MII. Mayra Lizeth Méndez Oloarte

Propiedad Intelectual

Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas

Sistemas

Administrador de Sistemas
Mtro. José Juan Reyes Torres
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

Mtra. María Teresa Meza Caiceros

Director General, ITSM, Veracruz, México

Mtro. Saúl Reyes Barajas

Director Académico, ITSM, Veracruz, México

Lic. Juan Antonio Hernández Morales

Director de Planeación y Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Mtra. Aracely Romano García

Subdirectora Académica, ITSM, Veracruz, México

Dr. Edgar Soto Meneses

Subdirector de Planeación, ITSM, Veracruz, México

Dr. José Luis Marín Muñiz

Subdirector de Posgrado e Investigación, ITSM, Veracruz, México

Dr. Federico Perera Zapata

Subdirector de Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Lic. Reyna Villalva Velasco

Subdirectora de Servicios Administrativos, ITSM, Veracruz, México

Comité de Revisión

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

Ingeniantes



03



11



19



29



40



48

Contenido

Modelo de acuicultura rural sostenible: propuesta de implementación comunitaria en la región de Misantla, Veracruz _____ 03

Juan José Hernández Napoleón; Denisse Arleth López Díaz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Influencia de la granularidad y proporción del aserrín de cedro (*Cedrela sp.*) sobre la germinación y el crecimiento inicial de maíz (*Zea mays*) _____ 11

Arturo Cabrera Vázquez, Escuela de Bachilleres Artículo Tercero, Alejandra Gamboa Hilario; Francisco Antonio Rodríguez Libreros; Gabriel Grosskelvin Núñez; Arturo Cabrera Hernández, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Potencial hidroenergético de la microcuenca del río Pixquiac en el estado de Veracruz utilizando Modelos Hidrológicos Distribuidos _____ 19

Juan José Marin Hernández; Jorge Arturo Del Ángel Ramos; Sara Patricia Ibarra Zavaleta; Raúl Alberto López Meraz, Universidad Veracruzana

Gestión de RPBI en hospitales privados: revisión narrativa estructurada de la brecha entre norma y práctica _____ 29

Gerardo Isaac Gómez Lara; Javier Guzmán Obando; Nora Hilda González Durán; Juan Carlos Guzmán García, Universidad Autónoma de Tamaulipas; Saúl Santiago Cruz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Desarrollo y validación de un dispositivo para determinar la infiltración de agua en suelos de agostaderos _____ 40

Ángel David Záizar González; Darío Cisneros Arreola; Merit Cisneros González; Manuel Ismael Mata Escobedo, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana

Evaluación de la Temperatura de Calentamiento en la Tecnología de Reciclaje de Polietileno Mediante Degradación _____ 48

Irma Pérez Hernández; José Echegaray Franyutti; Rosa M. Vaca Espino; Angelica Pérez Hernández, Universidad Veracruzana; José Nolasco Cruz, Universidad de Guanajuato

Ingeniantes



54



64



71



77



87



98

Prototipo IoT para la desinfección de frutas y hortalizas por aspersion o inmersión _____ 54

Heriberto Domingo Santiago, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Walter Ariel Silva Martínez, Universidad Autónoma del Carmen; Eduardo Fernández Echeverría, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla; Luis Enrique García Santamaría; Gregorio Fernández Lambert, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

El Xilitol, un edulcorante de alto valor agregado en la industria obtenido a partir de residuos lignocelulósicos _____ 64

Tyana Betsaida Aguilar Pastelín; María Guadalupe Aguilar Uscanga; María Inés Infanzón Rodríguez; Daniel Arturo Zavala Ortiz; Javier Gómez Rodríguez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Veracruz

Análisis Experimental de la carga de una batería tipo LiFePO4 _____ 71

Fernando Jurado Pérez; Erick A. González Barbosa; Rafael A. Rodríguez Moreno; José J. Vázquez Martínez; Nicolás Ortega Miranda, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Comportamiento tribológico de un acero 4140 nitrocarburizado ferrítico por sales _____ 77

Virgilio Alberto Aquino Cruz; Roberto Carlos Vega Morón, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepantla; Angel Manuel Delgado Brito, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán; Lizbeth Melo Máximo; José Solís Romero, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepantla

Comparativo con enfoque didáctico de análisis de armaduras en 2D utilizando SOLIDWORKS Simulation _____ 87

Alejandro Avila Delgado; Arturo Morales Benavides, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chihuahua

Análisis termo-mecánico de bloques de adobe adicionado con bagazo de caña y café _ 98

Luis Mateo Chavarín Verduzco; Ximena Trejo Contreras; Dominga Zuleica Chávez Pérez; José Ricardo Moreno Peña; Jorge Armando Ojeda Sánchez, Universidad de Colima



Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Modelo de acuicultura rural sostenible: propuesta de implementación comunitaria en la región de Misantla, Veracruz

RESUMEN: Este artículo presenta el diseño, validación y propuesta de escalamiento de un modelo de sistema acuícola rural sostenible adaptado a comunidades con recursos hídricos limitados en la región de Misantla, Veracruz. El modelo se basa en la cría de *Oreochromis niloticus* (tilapia), utilizando infraestructura de bajo costo, estanques circulares de entre 8 y 10 m³, y sistemas de recirculación hídrica que permiten un uso eficiente del recurso. La propuesta elimina el uso de geomembranas costosas y se enfoca en soluciones técnicas apropiadas para zonas con infraestructura básica.

Se justifica la elección de bombas de bajo consumo eléctrico, alevines resistentes de crecimiento rápido y alimentación balanceada controlada. A nivel económico, se aplicaron fórmulas de Tasa Interna de Retorno (TIR) y análisis de eficiencia hídrica para estimar el rendimiento del sistema. Se presentan resultados de una prueba piloto en Palpoala Ixcán, donde se obtuvo una tasa de sobrevivencia del 92 %, reducción del 15 % del gasto familiar en proteína animal, y una TIR estimada del 26.5 %.

El modelo incorpora principios de economía circular, inclusión social activa de mujeres, jóvenes y personas con discapacidad, y demuestra viabilidad para su réplica en otras comunidades rurales.

Palabras clave: Acuicultura rural, economía circular, eficiencia hídrica, inclusión social, sostenibilidad.



Colaboración

Juan José Hernández Napoleón; Denisse Arleth López Díaz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación: 14 de octubre de 2026

Autor de Correspondencia: Denisse Arleth López Díaz.

ABSTRACT: This article presents the design, validation, and scaling proposal of a sustainable rural aquaculture model adapted to communities with limited water resources in the Misantla region, Veracruz. The system is based on the farming of *Oreochromis niloticus* (tilapia), using low-cost infrastructure, circular ponds ranging from 8 to 10 m³, and water recirculation systems to maximize resource efficiency. The model excludes the use of geomembranes and instead focuses on technical solutions suitable for areas with limited infrastructure.

The selection of energy-efficient pumps, fast-growing fry, and balanced feed is technically justified. Economic analysis using Internal Rate of Return (IRR) and water efficiency metrics supports its profitability. A pilot study in Palpoala Ixcán yielded a 92 % survival rate, a 15 % reduction in household animal protein expenses, and an estimated IRR of 26.5 %.

The model incorporates circular economy principles, promotes social inclusion of women, youth, and people with disabilities, and demonstrates scalability for broader implementation in rural communities.

Keywords: Rural aquaculture, circular economy, water efficiency, social inclusion, sustainability.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de estrategias productivas sostenibles en comunidades rurales mexicanas ha llevado al desarrollo de modelos adaptados al aprovechamiento eficiente de los recursos naturales locales. En este contexto, la acuicultura rural se presenta como una alternativa viable para mejorar la seguridad alimentaria, diversificar los ingresos familiares y reducir la

dependencia de actividades agropecuarias de baja rentabilidad.

En la región de Misantla, Veracruz, existen condiciones geográficas y climáticas propicias para el desarrollo de sistemas acuícolas de pequeña escala, tales como una precipitación media anual entre 1,800 y 2,100 mm y temperaturas promedio de 23–25 °C [6]. Sin embargo, también enfrentan desafíos estructurales: acceso limitado a tecnología, falta de financiamiento y escasa capacitación técnica. Más del 40 % de la población en municipios aledaños vive en condiciones de pobreza y presenta carencias alimentarias [3].

El modelo que aquí se propone se enfoca en la cría de *Oreochromis niloticus*, utilizando estanques circulares de 8 a 10 m³, sistemas de filtración bio-mecánica artesanal, y una metodología de operación basada en recirculación de agua con bajo consumo energético. Este enfoque se aleja del uso de materiales costosos como la geomembrana y de la alimentación con subproductos agrícolas, priorizando el control de calidad del agua y la eficiencia alimenticia. La fórmula de eficiencia hídrica (E) utilizada en el análisis es la siguiente:

$$E_h = \frac{M_{tilapia}}{V_{agua}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

E_h = eficiencia hídrica (kg/L)

$M_{tilapia}$ = masa total de tilapia producida (kg)

V_{agua} = volumen total de agua utilizada durante el ciclo (L)

Adicionalmente, se evaluó la Tasa Interna de Retorno (TIR), empleando la fórmula financiera:

$$TIR = r \quad \text{cuando} \quad \sum_{t=0}^n \frac{\text{Flujo neto}_t}{(1+r)^t} = 0 \quad \text{Ec. (2)}$$

Este modelo se diferencia de otros sistemas similares como los implementados en Guatemala [4] y Perú [1], al incorporar no solo criterios técnicos y económicos, sino también componentes de inclusión social activa, como la participación de mujeres, jóvenes y personas con discapacidad.

La validación de este sistema se llevó a cabo mediante una prueba piloto durante 2023 en la comunidad de Palpoala Ixcán, donde se obtuvieron resultados alentadores: una tasa de sobrevivencia del 92 % y una reducción del 15 % en el gasto familiar en proteína animal. Estos resultados sugieren que el modelo es replicable, económicamente viable y socialmente inclusivo.

Por lo tanto, el presente artículo tiene como objetivo presentar la propuesta, validación técnica y evaluación de sostenibilidad de un sistema acuícola rural

que integra los principios de eficiencia hídrica, economía circular y desarrollo comunitario sostenible.

Contexto regional

Situación socioeconómica

La región de Misantla, situada en la zona centro-norte del estado de Veracruz, presenta una alta dispersión poblacional, dependencia de la agricultura tradicional y limitaciones de acceso a servicios básicos. Según datos de [3], el 47.2 % de los habitantes del municipio de Misantla vive en condiciones de pobreza y el 17.9 % en pobreza extrema, con carencias severas en alimentación, salud y vivienda.

La economía local se sostiene principalmente en la producción de café, maíz, caña de azúcar y cítricos, pero con bajo nivel de tecnificación y escasa diversificación productiva. Esta dependencia de cultivos vulnerables a los cambios de mercado y al clima coloca a las familias en situaciones de riesgo económico. En este contexto, es urgente implementar alternativas sostenibles, de bajo costo y con alto potencial de retorno, como lo es la acuicultura rural.

La acuicultura permite generar proteína de alto valor biológico en espacios reducidos, con baja inversión y sin requerir grandes extensiones de tierra ni infraestructura especializada. Además, su carácter modular la convierte en una opción ideal para ser replicada en zonas rurales dispersas.

Recursos hídricos disponibles

Misantla se localiza dentro de la cuenca media del río Nautla, una zona que cuenta con diversas fuentes de agua superficial como arroyos, manantiales y escurrimientos temporales. Con base en información de campo y datos del INEGI [6], se estima que en comunidades como Palpoala Ixcán existen al menos tres nacimientos de agua activos, con caudales estacionales entre 1.5 y 3 litros por segundo durante la mayor parte del año.

La disponibilidad hídrica, aunque moderada, resulta suficiente para abastecer sistemas acuícolas de pequeña escala, siempre que se utilicen técnicas de recirculación y filtración artesanal. Esta estrategia reduce el consumo neto de agua y evita la sobreexplotación de los manantiales locales. La fórmula utilizada para estimar la disponibilidad por sistema fue: por ejemplo, con un manantial de 2 L/s:

$$Q_{diario} = Q_{manantial} \times 86,400 \text{ (segundos/día)} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$Q_{diario} = 2 \times 86,400 = 172,800 \text{ L/día} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Esto es más que suficiente para operar entre 4 y 6 sistemas de 10 m³, incluso considerando tasas de recambio de hasta el 10 % diario.

Diseño del sistema acuícola rural

Se seleccionó la tilapia (*Oreochromis niloticus*) debido a su resistencia, crecimiento rápido, eficiencia alimenticia y baja exigencia en oxígeno disuelto, cualidades que han sido ampliamente documentadas por [1] y [4].

Como se muestra en las Figuras 1 y 2, el sistema está conformado por estanques circulares de entre 8 y 10 m³, construidos con materiales reforzados como malla electrosoldada, recubrimiento plástico de alta resistencia y capa impermeabilizante ecológica, eliminando así el uso de geomembrana, que resulta costosa y poco sostenible para zonas rurales.

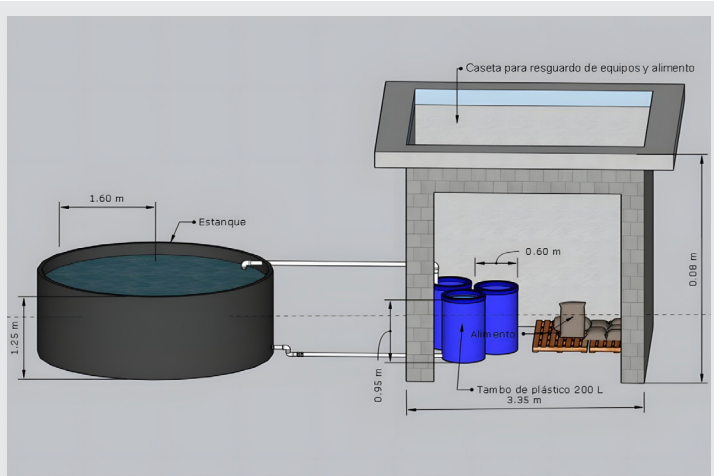


Figura 1. Diseño estructural del sistema acuícola rural con módulo de almacenamiento y alimentación (vista lateral). Fuente: Elaboración propia.

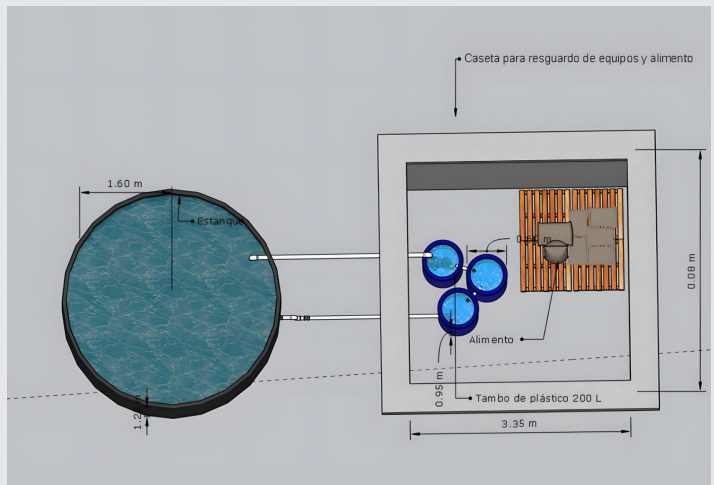


Figura 2. Diseño estructural del sistema acuícola rural con módulo de almacenamiento y alimentación (vista superior). Fuente: Elaboración propia.

Cada estanque se diseña con base en la fórmula del volumen de un cilindro:

$$V = \pi r^2 h \quad \text{Ec. (4)}$$

Para un estanque con 1.6 m de radio y 1.25 m de altura:

$$V = 3.1416 \times (1.6)^2 \times 1.25 = 10.05 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Estos volúmenes son suficientes para una siembra de hasta 200 alevines por estanque, manteniendo una densidad de 20 peces/m³, lo cual asegura buena conversión alimenticia y calidad del agua.

Sistema de recirculación y bombas

Se implementa un sistema de recirculación basado en filtros bio-mecánicos artesanales, compuestos por tres barriles conectados que permiten:

- Sedimentación primaria.
- Filtración mecánica (grava y arena).
- Filtración biológica (biomedios o esponjas).

Para mover el agua entre filtros y estanques, se utiliza una bomba sumergible de bajo consumo, con caudal de 800 a 1000 L/hora y potencia menor a 45W, lo que la hace apta para zonas rurales con acceso limitado a energía eléctrica. La elección de bomba se realizó con base en la siguiente fórmula de caudal diario mínimo:

$$Q_{min} = V_{estanque} \times 2 \text{ (renovación 2 veces al día)} \quad \text{Ec. (5)}$$

Ejemplo: Para un estanque de 10 m³:

$$Q_{min} = 10 \text{ m}^3 \times 2 = 20 \text{ m}^3/\text{día} = 20,000 \text{ L/día} \quad \text{Ec. (5.1)}$$

→ Requiere ≈ 850 L/h

Alimentación y alevines

Se usaron alevines de 5-10 g de peso inicial, seleccionados por su resistencia y procedencia certificada. Se suministró alimento balanceado comercial al 36 % de proteína durante el primer mes y posteriormente al 28 %, ajustando la ración según biomasa total, conforme a la fórmula:

$$\text{Ración diaria} = \text{Biomasa total (kg)} \times \% \text{ de alimentación} \quad \text{Ec. (6)}$$

Esto permite una gestión eficiente y controlada, sin depender de residuos agrícolas o ingredientes no estandarizados, eliminando riesgos sanitarios y variaciones nutricionales.

Diseño modular del sistema

- El diseño, funcional y replicable, contempla:
- Estanques de bajo costo.
 - Filtros artesanales hechos con materiales reciclados.
 - Caseta técnica para resguardo de equipos y alimento.
 - Caminos de acceso compactados para facilitar el manejo.

El sistema puede ampliarse o reducirse de acuerdo con las capacidades de cada familia, manteniendo los principios de eficiencia hídrica, economía circular y autonomía comunitaria.

MATERIAL Y MÉTODOS

Lugar de ejecución

El estudio fue realizado en el año 2023 en la comunidad de Palpoala Ixcán, municipio de Misantla,

Veracruz. Esta localidad cuenta con un clima cálido-húmedo, temperaturas promedio de 23-25 °C, altitudes entre 300 y 800 m s.n.m., y precipitación media de 1,800 a 2,100 mm anuales [6], condiciones óptimas para el cultivo de tilapia.

Diseño y construcción del sistema

Se diseñaron estanques circulares con un volumen útil de entre 8 y 10 m³, construidos mediante estructura metálica reforzada, plástico agrícola de alta resistencia y capa impermeabilizante de aplicación manual. Este diseño reemplaza el uso de geomembrana para reducir costos y aprovechar materiales disponibles en la región.

El volumen de cada estanque se determinó mediante la fórmula:

$$V = \pi r^2 h \quad \text{Ec. (4)}$$

Con un radio de 1.6 m y altura de 1.25 m:

$$V = 3.1416 \times (1.6)^2 \times 1.25 = 10.05 \text{ m}^3 \quad \text{Ec. (4.1)}$$

El sistema incorporó filtros bio-mecánicos artesanales construidos con tres barriles reciclados conectados entre sí. Cada filtro cumple funciones específicas:

Sedimentación primaria.

Filtrado mecánico (grava y arena).

Filtrado biológico (biomedios).

Para la circulación del agua se utilizó una bomba sumergible de 45 W, con caudal de 850-1000 L/hora, cumpliendo con la necesidad de recircular el volumen total del estanque dos veces al día.

Población y muestra

Se trabajó con tres unidades productivas, operadas por familias locales. La densidad de siembra fue de 20 peces/m³, equivalente a 200 alevines por estanque de 10 m³. Los alevines utilizados tenían un peso inicial de 5-10 gramos y fueron seleccionados por su adaptación al clima cálido y resistencia a condiciones rústicas.

Para estimar la biomasa inicial, se usó la fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Biomasa inicial} &= \text{Número de peces} \times \text{peso promedio} \\ &\rightarrow 200 \text{ peces} \times 0.007 \text{ kg} = 1.4 \text{ kg} \end{aligned} \quad \text{Ec. (7)}$$

Procedimientos operativos

Ciclo de producción: 6 meses.

Monitoreo: Quincenal, con muestreo aleatorio de crecimiento y peso.

Parámetros fisicoquímicos: Temperatura, pH y oxígeno disuelto, medidos con sensores portátiles.

Filtración: Limpieza manual semanal de barriles filtrantes.

Alimentación: Balanceado al 36 % de proteína inicial, ajustado al 28 % tras el primer mes. Se calculó con base en biomasa y temperatura.

Diseño experimental

Se empleó un diseño cuasiexperimental sin grupo control, enfocado en validación práctica. Los indicadores clave evaluados fueron:

Tasa de sobrevivencia (%).

Producción total por ciclo (kg).

Reducción del gasto familiar (%).

Participación comunitaria (% de mujeres y jóvenes).

El análisis se realizó bajo estadística descriptiva, contrastando los resultados reales con los valores esperados.

Sostenibilidad del sistema

El modelo acuícola rural propuesto fue diseñado bajo los principios de sostenibilidad ambiental, económica y social. Cada componente del sistema responde a criterios de eficiencia, bajo impacto y viabilidad de réplica en comunidades rurales de bajos recursos.

Sostenibilidad ambiental

Se priorizó el uso eficiente del agua mediante un sistema de recirculación controlada, lo que reduce drásticamente el consumo neto diario. La eficiencia hídrica se calculó con la fórmula:

$$E_h = \frac{M_{\text{tilapia}}}{V_{\text{agua}}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Se obtuvo una eficiencia hídrica $E_h = 0.0024$ kg/L (equivalente a 2.4 g/L).

Además, los sedimentos acumulados en el fondo de los estanques (restos fecales y alimento no consumido) se utilizaron como fertilizante orgánico para cultivos cercanos. Esto reduce la necesidad de agroquímicos y permite cerrar un ciclo de nutrientes dentro del mismo sistema.

Se evitó el uso de insumos químicos, antibióticos o materiales contaminantes como geomembranas, y se optó por materiales reciclables o reutilizables: barriles plásticos, mallas, tubos de PVC y contenedores agrícolas.

Sostenibilidad económica

Con una inversión promedio por unidad productiva de \$7,800 MXN (ajustada a precios reales 2024), el sistema es accesible para familias rurales. La rentabilidad se estimó mediante la fórmula de Tasa Interna de Retorno (TIR):

$$TIR = r \quad \text{cuando} \quad \sum_{t=0}^n \frac{\text{Flujo neto}_t}{(1+r)^t} = 0 \quad \text{Ec. (2)}$$

Con base en los costos y rendimientos proyectados (producción de 29 kg/estanque/ciclo, precio de venta: \$65/kg), se obtuvo una TIR del 26.5 %, con punto de equilibrio alcanzado al segundo ciclo. Además, el uso de materiales reciclados reduce los

costos fijos. Por ejemplo:

Filtros contruidos con barriles reciclados: \$0.

Sombra con malla agrícola reutilizada: \$250 aprox.

Costos energéticos mensuales (bomba de 45W): \$50-60.

Esto permite sostener el sistema incluso con ingresos variables o crisis económicas.

Sostenibilidad social

El modelo fue diseñado para ser operado por familias, con especial énfasis en la inclusión de:

Mujeres (madres jefas de hogar).

Jóvenes sin empleo formal.

Personas con discapacidad motriz leve, que pueden encargarse del monitoreo, alimentación o registro de datos sin esfuerzo físico intenso.

En la prueba piloto, el 67 % de las actividades operativas fueron realizadas por mujeres y adolescentes, lo cual demuestra que el sistema es incluyente y fomenta la equidad.

Asimismo, la capacitación técnica fue clave: se impartieron talleres básicos de manejo acuícola, uso de bombas, muestreo y mantenimiento de filtros. Este proceso empoderó a los participantes, redujo la dependencia externa y fortaleció el tejido comunitario.

Integración de economía circular

El sistema aprovecha al máximo los recursos y genera múltiples flujos de valor:

Agua reutilizada para ferti-riego.

Sedimento para fertilización.

Equipos reciclados en su construcción.

Producción local para autoconsumo o venta directa.

Este enfoque cierra los ciclos productivos, disminuye residuos y mejora la resiliencia del hogar rural.

RESULTADOS

Esperados y validación piloto

La implementación del modelo acuícola rural sostenible proyecta resultados positivos en términos productivos, económicos, sociales y ambientales, en comunidades con características similares a las de la región de Misantla, Veracruz.

Rendimiento esperado por unidad

Con un volumen operativo de 10 m³ por estanque, una densidad de 20 peces/m³ y una tasa de conversión alimenticia (FCR) estimada de 1.7:1, se esperan producciones entre 25 y 30 kg de tilapia por ciclo de seis meses.

La eficiencia alimenticia se mantiene controlada gracias al uso exclusivo de alimento balanceado comercial y un seguimiento quincenal de la biomasa.

Validación piloto (Palpoala Ixcán, 2023)

Durante el año 2023 se ejecutó una prueba piloto del sistema en la comunidad de Palpoala Ixcán, con la participación de tres familias rurales. Cada una operó un estanque de 10 m³, equipado con sistema de filtración artesanal y bomba sumergible de bajo consumo. Se eliminó completamente el uso de geomembrana y subproductos agrícolas como fuente de alimento.

Metodología aplicada en la validación

Duración: 6 meses.

Siembra: 200 alevines por estanque.

Seguimiento: Registro de peso y talla quincenal.

Medición del agua: pH, temperatura y oxígeno disuelto.

Evaluación: Encuestas semiestructuradas y análisis de datos económicos.

Tabla 1. Resultados Obtenidos.

Indicador	Resultado
Tasa de sobrevivencia	92%
Producción total acumulada	87 kg (promedio: 29 kg por estanque)
Reducción del gasto familiar en proteína animal	15%
Tasa interna de retorno estimada	26.5% anual
Participación de mujeres y jóvenes	67% de las labores operativas
Costos reales por ciclo	\$2,800-\$3,400 MXN por unidad

Fuente: Elaboración propia.

La tasa de reducción del gasto familiar se calculó considerando el precio promedio de proteína animal en la región (\$75/kg), y el consumo mensual por familia.

$$\text{Reducción} = \frac{(\text{Consumo previo} - \text{Producción acuicola})}{\text{Consumo previo}} \times 100 \text{ Ec. (8)}$$

Conclusiones del piloto

El sistema es técnicamente viable, con buena sobrevivencia y rendimientos aceptables.

Económicamente accesible, con punto de equilibrio alcanzado al segundo ciclo.

Socialmente apropiado, al incluir y capacitar a grupos vulnerables.

Ambientalmente eficiente, al integrar recirculación y reúso de sedimentos.

CONCLUSIONES

El modelo de sistema acuícola rural propuesto en este estudio demuestra ser una alternativa viable, accesible y replicable para el desarrollo productivo en comunidades marginadas del estado de Veracruz. La validación práctica en Palpoala Ixcán permitió constatar su funcionalidad, impacto social y potencial de escalamiento regional.

Desde una perspectiva técnica, el uso de estanques circulares sin geomembrana, junto con un sistema

de filtración bio-mecánica artesanal y recirculación hídrica, optimiza el aprovechamiento de recursos y permite el mantenimiento de condiciones adecuadas para la cría de tilapia. La elección de alevines certificados, alimento balanceado controlado y bombas de bajo consumo eléctrico reduce los riesgos sanitarios, garantiza resultados consistentes y mantiene bajos los costos operativos.

En cuanto al desempeño económico, la inversión inicial por unidad es asequible, con costos de operación ajustados y una Tasa Interna de Retorno (TIR) estimada de 26.5 %, alcanzando el punto de equilibrio tras el segundo ciclo de producción. La producción promedio de 29 kg por estanque y el uso de productos para autoconsumo permiten una reducción del 15 % en el gasto familiar en proteína animal.

Ambientalmente, el sistema cumple con los principios de economía circular, al reciclar materiales en su construcción, reutilizar el agua en ferti-riego y aprovechar los sedimentos como fertilizante orgánico. La eficiencia hídrica medida $E_h = 0.0024$ "kg/L (2.4 g/L) demuestra un uso responsable del recurso en comparación con otros sistemas rurales similares.

Socialmente, se fomenta la inclusión de mujeres, jóvenes y personas con discapacidad, mediante capacitación, participación en la operación y toma de decisiones. Este enfoque fortalece la autonomía local y genera capital social sostenible, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible [7].

Por tanto, se concluye que el modelo puede ser implementado en zonas con acceso limitado a infraestructura, fomenta la seguridad alimentaria y el autoempleo, cumple con criterios técnicos, económicos y sociales.

Se recomienda continuar con procesos de capacitación comunitaria, monitoreo técnico y alianzas institucionales para su expansión a nivel regional. Este modelo representa una herramienta efectiva de resiliencia rural, integración social y producción sustentable.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Tecnológico Superior de Misantla, al SECIHTI por su compromiso con la investigación científica y su apoyo a jóvenes investigadores, al CITT, y a las comunidades participantes por su colaboración y apertura.

BIBLIOGRAFÍA

[1] M. C. Chávez-Sánchez, M. P. Hernández-Vergara y J. A. Huerta-Cordero, *Manual OMO de cultivo de tilapia*, Tepic, Nayarit: Universidad Autónoma de Nayarit, 2021.

[2] CONAGUA, *Estadísticas del Agua en México*, Comisión Nacional del Agua, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua>.

[3] CONEVAL, *Informe de pobreza municipal en Veracruz*, Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.coneval.org.mx>

[4] FAO, *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022: Hacia la transformación azul*, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/cc0461es/cc0461es.pdf>.

[5] A. F. Gómez y R. E. Olgún, "Diseño e implementación de filtros artesanales en sistemas de acuicultura de pequeña escala," *Revista Mexicana de Acuicultura Rural*, vol. 15, no. 2, pp. 45–58, 2019.

[6] INEGI, *Anuario Estadístico y Geográfico de Veracruz 2022*, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/>.

[7] PNUD, *Economía circular para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe*, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.undp.org/es/publications/economia-circular>

ANEXOS TÉCNICOS

Tabla 2. Ficha del sistema acuícola rural.

Elemento	Descripción técnica
Especie cultivada	<i>Oreochromis niloticus</i> (tilapia)
Volumen útil del estanque	10 m ³ (diámetro ≈ 3.2 m, altura ≈ 1.25 m)
Estructura del estanque	Malla electrosoldada + recubrimiento plástico + impermeabilizante ecológico
Densidad de siembra	20 peces/m ³ = 200 peces por estanque
Duración del ciclo	6 meses
Tipo de alimentación	Balanceado comercial (36% proteína al inicio, 28% al mes siguiente)
Sistema de filtración	Filtro bio-mecánico de 3 etapas (sedimentación, mecánica y biológica)
Bomba utilizada	Sumergible, 45 W, caudal 850–1000 L/h
Frecuencia de recirculación	2 renovaciones completas diarias del volumen total
Consumo eléctrico mensual	Aproximadamente \$55–\$60 MXN
Costo estimado por unidad	\$7,800 MXN
Producción por ciclo	25–30 kg de tilapia
TIR estimada	26.5%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Cuadro resumen de impacto.

Dimensión	Indicador	Valor alcanzado
Técnica	Tasa de sobrevivencia	92%
Productiva	Producción promedio por ciclo	29 kg
Económica	TIR	26.5%
Social	Participación de mujeres y jóvenes	67% de las labores
Ambiental	Eficiencia hídrica	0.0024 kg/L (2.4 g/L)
Alimentaria	Reducción del gasto en proteína	15%

Fuente: Elaboración propia.





Bioquímica
y
Biológicos

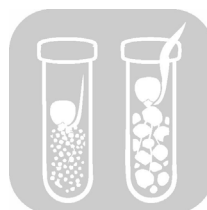
Ingeniantes

Influencia de la granularidad y proporción del aserrín de cedro (*Cedrela sp.*) sobre la germinación y el crecimiento inicial de maíz (*Zea mays*)

RESUMEN: El aserrín de cedro (*Cedrela sp.*), un subproducto abundante de la industria maderera en la región de Misantla, Veracruz, representa un material con potencial de aprovechamiento, aunque con frecuencia es desechado a cielo abierto. Diversos estudios han señalado que su acumulación puede generar efectos fitotóxicos en el suelo y provocar la inmovilización de nitrógeno, afectando la disponibilidad de este nutriente para las plantas. En el presente estudio se evaluó el efecto de dicho residuo sobre la germinación y el desarrollo temprano de plántulas de maíz (*Zea mays*). Se implementó un diseño factorial completo que evaluó cuatro niveles de tamaño de partícula y cinco proporciones de la mezcla aserrín/tierra, aplicando análisis ANOVA y pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$).

Los resultados mostraron un efecto inhibitorio significativo en la germinación y el crecimiento de la plántula, a medida que se incrementó la proporción de aserrín. La germinación se redujo drásticamente en sustratos con altas concentraciones de aserrín y partículas finas (< 0.85 mm), registrando un mínimo de 9.52 %, asociado a la compactación del sustrato y la liberación de compuestos alelopáticos. Las longitudes de la raíz fueron mínimas en tratamientos con 100 % de aserrín, evidenciando una fuerte fitotoxicidad. La consistencia de los resultados en biomasa húmeda y seca confirma una reducción real en la acumulación de biomasa estructural. Se concluye que el aserrín de cedro, especialmente en partículas finas y en altas proporciones, limita la germinación y el crecimiento inicial del maíz.

PALABRAS CLAVE: Aserrín de cedro, *Cedrela sp.*, maíz, fitotoxicidad, germinación, alelopático



Colaboración

Arturo Cabrera Vázquez, Escuela de Bachilleres Artículo Tercero, Alejandra Gamboa Hilario; Francisco Antonio Rodríguez Libreros; Gabriel Grosskelvin Núñez; Arturo Cabrera Hernández, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 17 de agosto de 2025

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2026

Autor de Correspondencia: Arturo Cabrera Hernández

ABSTRACT: Cedar (*Cedrela sp.*), sawdust, an abundant byproduct of the timber industry in the Misantla region of Veracruz, represents a material with potential for utilization, although it is frequently disposed of in the open. Several studies have indicated that its accumulation can generate phytotoxic effects in the soil and cause nitrogen immobilization, affecting the availability of this nutrient for plants. This study evaluated the effect of this residue on the germination and early development of corn (*Zea mays*) seedlings. A full factorial design was implemented, evaluating four particle size levels and five sawdust/soil mixture ratios, applying ANOVA analysis and nonparametric tests (Kruskal-Wallis, $p < 0.05$).

The results showed a significant inhibitory effect on germination and seedling growth as the sawdust ratio increased. Germination was drastically reduced in substrates with high concentrations of sawdust and fine particles (< 0.85 mm), recording a minimum of 9.52 %, associated with substrate compaction and the release of allelopathic compounds. Root lengths were minimal in treatments with 100 % sawdust, demonstrating strong phytotoxicity. The consistency of the results in wet and dry biomass confirms a real reduction in the accumulation of structural biomass. It is concluded that cedar sawdust, especially in fine particles and in high proportions, limits germination and initial growth of corn.

KEYWORDS: Cedar sawdust, *Cedrela sp.*, corn, phytotoxicity, germination, allelopathic.

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Misantla, Veracruz, la industria del mueble de madera se caracteriza por la utilización de madera de cedro aplicando tecnologías artesanales e improvisadas, con métodos productivos técnicamente poco estructurados y carentes de un equilibrio operativo. Esta condición no solo limita la eficiencia en la producción, sino que también reduce significativamente el aprovechamiento del recurso forestal [1], generando una elevada cantidad de residuos de madera durante la elaboración de los muebles. La ausencia de tecnologías orientadas al aprovechamiento de dichos residuos ocasiona que volúmenes considerables de aserrín y viruta de cedro sean dispuestos a cielo abierto, lo que contribuye a impactos ambientales negativos en el entorno [2].

El aserrín derivado de la industria maderera, constituye un subproducto abundante y de bajo costo, cuyo uso como medio de cultivo se ha extendido en diversas regiones debido a su ligereza, buen drenaje y accesibilidad [3,4], también ha sido señalado con potencial para mejorar la calidad del suelo, al favorecer el incremento de humus, la capacidad de intercambio catiónico, la formación de agregados, la retención de humedad y la porosidad de aireación [5,6]. No obstante, su aplicación también puede generar efectos adversos. Diversos estudios han demostrado que algunos residuos de madera pueden ejercer efectos fitotóxicos que afectan la germinación y el desarrollo inicial de las plantas asociadas a su baja capacidad de intercambio catiónico, lenta descomposición [7], presencia de compuestos tóxicos de la madera, como resinas, trementina y taninos [8,9], así como a la inmovilización y agotamiento de nutrientes como el nitrógeno, durante la descomposición del aserrín [10].

El impacto varía según el tipo de madera, reportando efectos fitotóxicos severos para el aserrín de cedro, el cual se asocia a una reducción en la germinación y el crecimiento de leguminosas como guisantes y frijoles; mientras que para aserrín de especies como abeto o cicuta, se presentan efectos positivos [11,12]. Por lo tanto, dependiendo del tipo de madera de origen y de las condiciones de uso, se presentan tanto efectos benéficos como adversos en el crecimiento vegetal [13]. Lo anterior pone de manifiesto la importancia de evaluar las características químicas y toxicológicas de los residuos madereros antes de su incorporación al suelo o su uso en sistemas agrícolas (14).

El maíz (*Zea mays*) es uno de los cultivos más versátiles y estratégicos a nivel global al representar más del 40 % de la producción mundial de cereales, ubicándose como el tercer cereal más importante del mundo [15]. Su notable adaptabilidad a diversas condiciones agroclimáticas, le permite crecer en una amplia gama de temperaturas, altitudes y tipos de suelo, con un elevado rendimiento y rápido crecimiento [16].

En el presente estudio se evaluó la germinación y el crecimiento inicial de semillas de maíz (*Zea mays* L.) en sustratos formulados con diferentes proporciones y tamaños de partícula de aserrín de cedro. El objetivo fue aprovechar la adaptabilidad de este grano y analizar la respuesta fisiológica del maíz ante la presencia de aserrín de cedro, con el propósito de identificar posibles efectos sobre las etapas tempranas de su desarrollo vegetal.

MATERIAL Y MÉTODOS

Reactivos y material biológico

Semillas de maíz (*Zea mays*) fueron recolectadas en 2024 en una parcela de la localidad Loma del Cojolite, municipio de Misantla, Veracruz (19.975° N; -96.82167° O). Los granos secos se almacenaron en un recipiente herméticamente cerrado hasta su uso. El aserrín y la viruta de cedro fueron donados por la carpintería La Gloria, ubicada en Misantla, Veracruz. Estos materiales se clasificaron de acuerdo con el tamaño de partícula mediante tamices de acero inoxidable (JMR Equipos SAC) con malla 20 (0.85 mm), malla 16 (1.18 mm) y malla 10 (2.00 mm), obteniéndose cuatro fracciones: A) <0.85 mm, B) 0.85–1.18 mm, C) 1.19–2.00 mm y D) >2.00 mm. La tierra utilizada se obtuvo del campo agrícola experimental del Instituto Tecnológico Superior de Misantla y fue cernida con los mismos tamices empleados para el cedro.

Siembra de semillas de maíz en tierra

Grupos de siete semillas de maíz se sembraron a 0.5 cm de profundidad en macetas comerciales de plástico que contenían 200 gramos de las mezclas aserrín/tierra en las proporciones indicadas en el diseño experimental. Se realizaron 12 réplicas para cada punto experimental.

Las macetas se incubaron bajo condiciones de iluminación y temperatura ambiente durante el mes de agosto dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, México (coordenadas geográficas: 19° 57' 01.36" Norte, 96° 50' 37.89" Oeste), altitud de 298 m sobre el nivel del mar, caracterizada por un clima subtropical húmedo con una temperatura media anual máxima promedio de 32 °C y mínima de 22 °C con un régimen de riego de tres veces por semana.

Se realizaron observaciones diarias para determinar el progreso de la germinación de las semillas. Se consideró como germinadas aquellas semillas donde el hipocótilo emergió de la superficie del suelo. Al día 6 se extrajeron las plántulas y se midieron la longitud del tallo, definida como la distancia desde el suelo hasta el ápice de las hojas primordiales y la longitud de la raíz, desde la semilla hasta el meristemo apical de la raíz principal. Se evaluó el porcentaje de germinación, así como parámetros morfométricos (longitud y peso de raíz y tallo) a los 5 días de siembra.

Diseño de experimentos

El diseño experimental correspondió a un diseño factorial completo con dos factores principales: (i) el tamaño de partícula del aserrín de cedro (granularidad) y (ii) la proporción de la mezcla aserrín de cedro-tierra. El factor tamaño de partícula incluyó cuatro niveles: A) < 0.85 mm, B) 0.85–1.18 mm, C) 1.19–2.00 mm y D) > 2.00 mm. El factor proporción de mezcla consideró cinco niveles: 0 %/100 %, 25 %/75 %, 50%/50 %, 75 %/25 % y 100 %/0 % (aserrín/tierra). La combinación de factores generó un total de 20 tratamientos experimentales (Figura 1).

Análisis estadístico

Los datos se recopilaron y ordenaron utilizando el software Excel® 2016. Para el análisis estadístico de los datos de porcentaje de germinación a fin de que los porcentajes sigan una distribución normal y varianzas homogéneas, se aplicó la corrección de Finney y posteriormente la transformación de Bliss, con lo cual se aplicó el análisis ANOVA y como prueba posthoc la prueba de Tukey. Para los datos de longitud de tallo y raíz, así como peso de tallo y raíz se verificó la normalidad de los datos y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilks y Levene. Dado que no se presentó el supuesto de normalidad para ciertos grupos de datos, se aplicó estadística no paramétrica. Como prueba de hipótesis se empleó la prueba de Kruskal-Wallis, ($p < 0.05$). La significancia entre medias se verificó mediante la prueba post-hoc de Dunn.

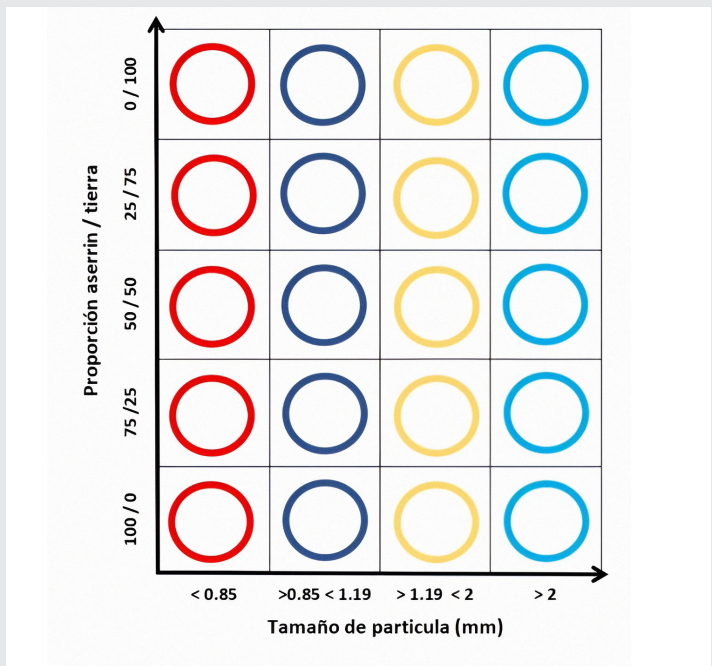


Figura 1: Diseño factorial para evaluar los efectos individuales y de interacción de dos factores: (i) proporción de aserrín y tierra, con cinco niveles (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 y 0/100 %). (ii) el tamaño de partícula de aserrín o viruta de cedro, con cuatro niveles, A) <0.85 mm, B) 0.85–1.18 mm, C) 1.19–2.00 mm y D) >2.00 mm; lo cual generó un total de 20 puntos experimentales. Fuente: Elaboración propia

El análisis estadístico y gráfico de los datos se realizó empleando el software OriginPro. Las comparaciones múltiples entre tratamientos se agruparon mediante asignación de letras, de modo que los grupos sin diferencias significativas compartieron la misma letra, mientras que aquellos con diferencias significativas recibieron letras distintas. La asignación de tales letras, se realizó empleando la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI, 2025). A partir de la matriz de valores de “p” obtenidos del software OriginPro; con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

RESULTADOS

Germinación acumulada de semillas de maíz (Zea mays)

La Tabla 1 presenta los valores promedio de germinación acumulada al cuarto día posterior a la siembra, el cual inició desde el primer día, mostrando respuestas diferenciales y estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados. El control negativo (suelo tratado únicamente con agua purificada), la germinación alcanzó valores superiores al 65 % en partículas de 0.85–1.19 mm ($66.66 \pm 17.67 \%$) y mayores a 2 mm ($67.53 \pm 16.25 \%$), lo que representa los valores más altos dentro de los tratamientos. En contraste, la germinación se redujo drásticamente en las mezclas con altas proporciones de aserrín, con una disminución significativa en el porcentaje de germinación, particularmente en partículas finas (<0.85 mm), donde los valores oscilaron entre 9.52 y 26.19 %, ubicándose en los grupos “e–g”, lo que sugiere que la reducción en el tamaño de partícula ejerce un efecto adverso sobre el establecimiento de las plántulas.

Este comportamiento concuerda con estudios que señalan que partículas muy finas pueden compactar el sustrato, limitar la aireación y dificultar el crecimiento de las raíces primarias así como una mayor liberación de compuestos fenólicos y terpenoides del cedro, los cuales han sido descritos como alelopáticos y con capacidad de afectar la viabilidad y el vigor de las semillas [14]. Resultados similares han sido reportados en residuos lignocelulósicos de pino y eucalipto, donde la inhibición de la germinación fue más pronunciada en fracciones finas debido a su mayor área superficial y disponibilidad de compuestos solubles [8].

Con respecto al factor proporción de aserrín de cedro en la mezcla, se detectó un efecto inhibitorio progresivo en la germinación. La presencia de aserrín, ya fuera de manera individual o en combinación con suelo, redujo significativamente la germinación en comparación con el control.

Este efecto ha sido atribuido en la literatura a la liberación de compuestos fenólicos y extractivos presentes en la madera de cedro, los cuales poseen actividad alelopática y pueden afectar la permeabilidad de las membranas celulares, el metabolismo de las semillas

y la absorción de agua [10,12]. La inhibición fue evidente en todas las proporciones evaluadas, aunque se intensificó con el aumento en el porcentaje de aserrín.

Tabla 1. Porcentaje de germinación de semillas de maíz (*Zea mays*) en sustratos con diferentes granularidades y concentraciones de aserrín de cedro.

N°	Tamaño de partícula (cm)	Proporción (aserrín/tierra)	Porcentaje de germinación
1	<0.85	100/0	26.19 ± 17.84 e,f
2	<0.85	75/25	9.52 ± 10.96 g
3	<0.85	50/50	21.42 ± 17.84 e,f,g
4	<0.85	25/75	23.80 ± 21.36 e,f,g
5	<0.85	0/100	23.80 ± 20.79 e, f, g,
6	>0.85	100/0	14.28 ± 14.70 f, g
7	>0.85	75/25	21.42 ± 16.43 f, g
8	>0.85	50/50	30.95 ± 23.63 d, e
9	>0.85	25/75	23.80 ± 22.45 e, f, g,
10	>0.85	0/100	66.66 ± 17.67 a
11	>1.19 <2	100/0	23.80 ± 19.60 e, f, g,
12	>1.19 <2	75/25	20.63 ± 16.41 e, f, g
13	>1.19 <2	50/50	50 ± 16.43 b, c
14	>1.19 <2	25/75	45.23 ± 20.35 c, d
15	>1.19 <2	0/100	64.28 ± 19.75 a, b
16	>2	100/0	35.71 ± 22.05 c, d, e
17	>2	75/25	50 ± 19.75 b, c
18	>2	50/50	42.85 ± 18.33 c, d
19	>2	25/75	47.61 ± 21.36 c
20	>2	0/100	67.53 ± 16.25 a

Estos resultados sugieren que tanto el tamaño de partícula como la proporción de aserrín actúan como factores limitantes para la germinación de maíz. El efecto combinado de partículas finas y altas proporciones de aserrín conduce a una reducción en el establecimiento de plántulas, lo que sugiere la interacción entre factores físicos (estructura del sustrato) y químicos (compuestos alelopáticos).

Efecto en la longitud de tallo

Los resultados muestran que la longitud de la parte aérea de la plántula de maíz estuvo significativamente influenciada por la proporción de aserrín y tierra en el sustrato (Figura 2). En general, las mayores longitudes de tallo se obtuvieron en los tratamientos con la proporción 0 % / 100 % (sólo tierra), alcanzando valores de hasta 22.97 cm, los cuales se ubicaron en el grupo estadístico "a".

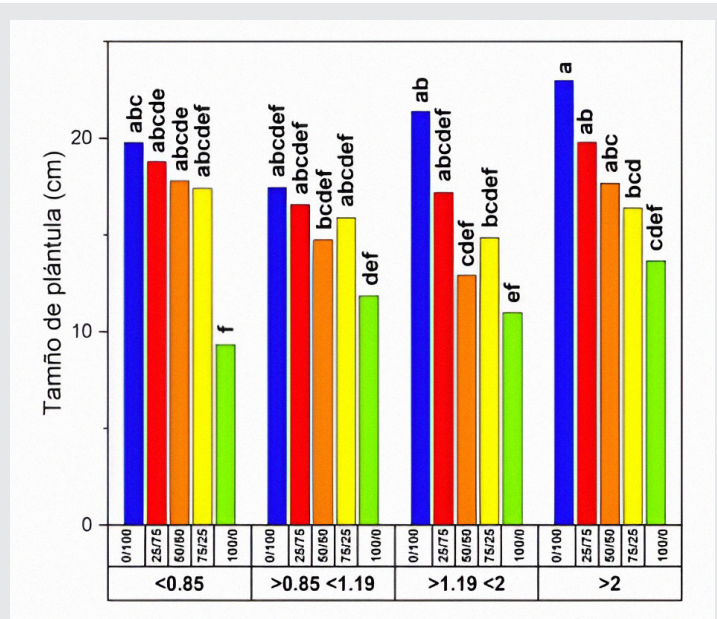


Figura 2: Gráfica de barras para el tamaño promedio de plántula de maíz (*Zea mays*) en función de la interacción entre la proporción de aserrín de cedro/tierra y el tamaño de partícula. En el eje de las abscisas se indican la proporción de la mezcla aserrín/tierra: 0 %/100 %, 25 % / 75 %, 50 %/50 %, 75 % / 25 % y 100 %/0 % (números verticales), así como los intervalos del tamaño de partícula del aserrín de cedro: <0.85 mm; 0.85–1.18 mm; 1.19–2.00 mm y >2.00 mm (números horizontales). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

Conforme aumentó la proporción de aserrín en la mezcla, se observó una reducción progresiva en la longitud del tallo, siendo más marcada en los tratamientos con partículas finas (< 0.85 mm) y con niveles altos de aserrín (100 %), donde la longitud descendió hasta 9.32 cm, agrupándose en el nivel "f". Estos resultados concuerdan con reportes previos que señalan que la presencia de compuestos fenólicos en el aserrín de cedro puede ejercer efectos alelopáticos y fitotóxicos sobre la germinación y el crecimiento de plántulas, al interferir en la absorción de nutrientes y agua [10,12].

Efecto en la longitud de raíz

El crecimiento radical mostró una clara y significativa dependencia tanto del tamaño de partícula de la viruta de cedro como de la proporción de aserrín y tierra en el sustrato. Los mayores valores de longitud de raíz

se registraron en el tratamiento con partículas intermedias (>0.85 <1.19 mm) y con 100% tierra, alcanzando un promedio de 19.20 cm y agrupándose en la categoría estadística “a”.

En contraste, los valores más bajos corresponden a los tratamientos con 100% de aserrín, para cualquier tamaño de partícula, con longitudes entre 3.13 y 4.21 cm (grupo “i”), lo que refleja un efecto fuertemente inhibitorio del aserrín sobre el desarrollo radical, aunque a tamaños de partícula mayores a 2 mm., el efecto es mas moderado. Lo anterior sugiere que el predominio de aserrín de cedro en el sustrato genera condiciones adversas para el crecimiento de raíces, probablemente debido tanto a la baja disponibilidad de nutrientes minerales como a la presencia de metabolitos secundarios, tales como compuestos fenólicos y terpenoides, previamente reportados como alelopáticos y fitotóxicos [10, 12].

Los resultados evidencian que el sustrato compuesto únicamente por suelo favorece un desarrollo radical más vigoroso, mientras que la incorporación de aserrín de cedro en proporciones crecientes provoca una reducción significativa en la longitud de la raíz, un efecto más pronunciado cuando se emplean partículas finas y concentraciones elevadas de aserrín.

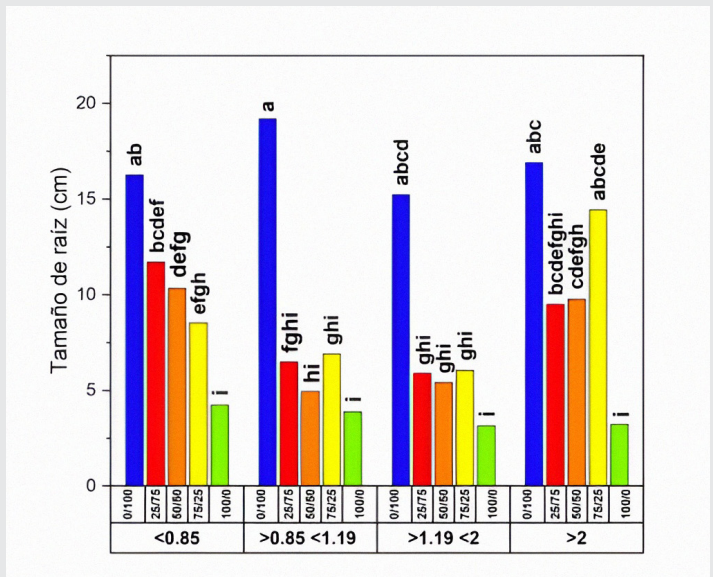


Figura 3: Gráfica de barras para el tamaño promedio de la raíz de plántulas de maíz (*Zea mays*) en función de la interacción entre la proporción de aserrín de cedro/tierra y el tamaño de partícula. En el eje de las abscisas se indican la proporción de la mezcla aserrín/tierra: 0 %/100 %, 25 %/75 %, 50 %/50 %, 75 %/25 % y 100 %/0 % (números verticales), así como los intervalos del tamaño de partícula del aserrín de cedro: <0.85 mm; 0.85–1.18 mm; 1.19–2.00 mm y >2.00 mm (números horizontales). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

Efecto en el peso del tallo

El análisis de la interacción entre el tamaño de partícula de la viruta de cedro y la proporción de aserrín/tierra mostró efectos significativos sobre el peso del tallo. Los mayores valores se obtuvieron en el tratamiento con partículas >2 mm y solo tierra (proporción 0/100), el cual presentó una diferencia significativa de la mayoría de los tratamientos, siendo el grupo de mayor acumulación de biomasa (Figura 4, panel superior) Además, se observa que las mezclas con predominio de suelo favorecieron valores altos para el peso de tallo, mientras que al aumentar la proporción de aserrín, el peso del tallo disminuye alcanzando los valores más bajos en partículas intermedias (1.19–2 mm) y más finas (<0.85 mm).

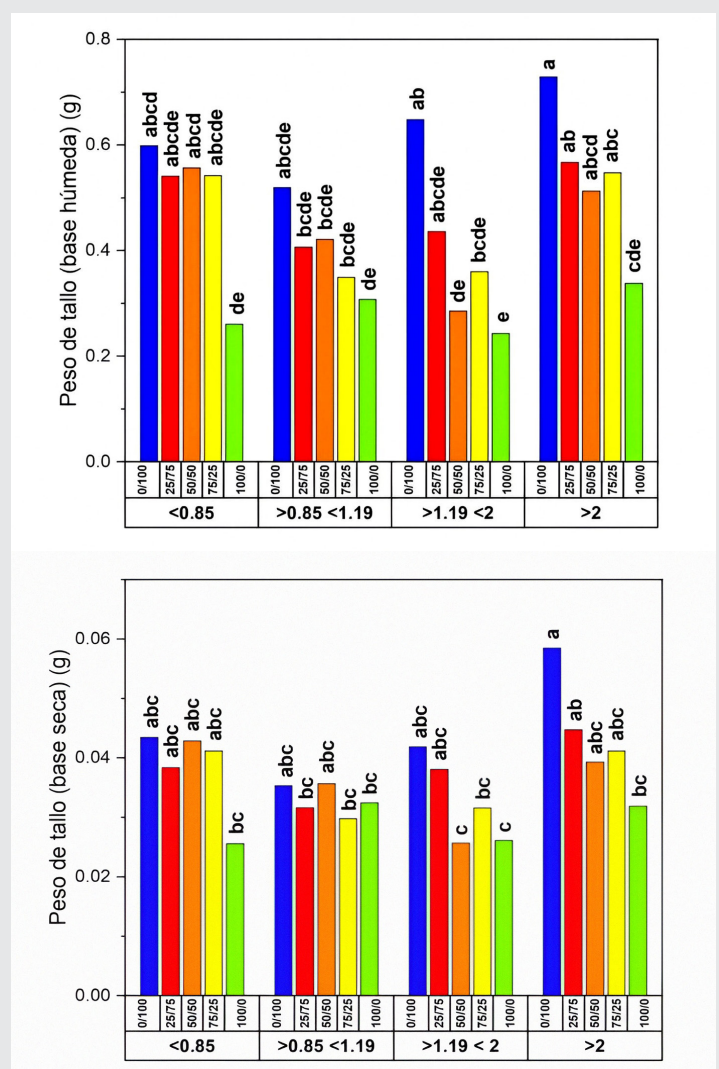


Figura 4: Gráfica de barras para el peso promedio de tallo de plántulas de maíz (*Zea mays*) en función de la interacción entre la proporción de aserrín de cedro/tierra y el tamaño de partícula en base húmeda (panel superior) y base seca (panel inferior). En el eje de las abscisas se indican la proporción de la mezcla aserrín/tierra (números verticales), así como los intervalos del tamaño de partícula del aserrín de cedro: <0.85 mm; 0.85–1.18 mm; 1.19–2.00 mm y >2.00 mm (números horizontales). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento concuerda con reportes previos que señalan que residuos de madera de cedro liberan compuestos tales como ácidos alifáticos y alcohol, flavonoides, tocoferol, monoterpenos, sesquiterpenos, triterpenos, cicloartanos, esteroides y limonoides (14), algunos de ellos con efectos alelopáticos, los cuales pueden inhibir procesos fisiológicos en plántulas de monocotiledóneas y otras gramíneas, reduciendo la acumulación de biomasa aérea y radicular [10].

Las partículas más finas exacerbaron este efecto posiblemente debido a la compactación del sustrato y a una mayor superficie específica que facilita la liberación de estos metabolitos secundarios [8]. Un similar comportamiento se observó para la biomasa en base seca (Figura 4, panel inferior), lo que confirma que las diferencias observadas entre tratamientos no se deben exclusivamente al contenido de agua en los tejidos, sino a una reducción real en la acumulación de biomasa estructural. La consistencia para ambos indicadores peso húmedo y seco) aporta evidencia sólida sobre el efecto negativo del aserrín de cedro en el crecimiento temprano del maíz.

Efecto en el peso del raíz

Los resultados obtenidos para el peso de la raíz de maíz en base húmeda y seca mostraron que tanto el tamaño de partícula del aserrín de cedro como su proporción en la mezcla con suelo, influyeron significativamente en la variable de respuesta (Figura 5).

En términos generales, las mayores medias de peso radicular se observaron en las mezclas con partículas gruesas (>2 mm), alcanzando un valor máximo de 0.7287 g en la proporción 0%/100% (únicamente suelo), seguido de valores intermedios en las combinaciones 25/75 y 75/25, las cuales se agruparon en las categorías estadísticas A y B según la prueba post hoc de Dunn. Siguiendo el comportamiento de la longitud de raíz, al incrementar la proporción de aserrín de cedro se observa una disminución significativa en el peso de la raíz asociado a el efecto inhibitorio del aserrín sobre el desarrollo radical, reforzando la hipótesis sobre la generación de condiciones adversas para el desarrollo de las raíces, asociados a los efectos alelopáticos del aserrín de cedro y a una posible inmovilización de nitrógeno, fenómeno ampliamente documentado en la literatura para residuos lignocelulósicos frescos. Dicho efecto se traduce en una menor disponibilidad de nutrientes y oxígeno en la rizósfera, limitando el crecimiento radicular [10, 12].

Cabe destacar que al comparar los datos en base seca y húmeda se mantuvieron las mismas tendencias y los mismos grupos de significancia estadística, lo cual sugiere que las diferencias encontradas son robustas y no dependen de la variabilidad en el contenido de agua de los tejidos. Este hallazgo es consistente con la idea de que los efectos observados se deben principalmente a la interacción física-química del sustrato y no a fluctuaciones hídricas momentáneas.

CONCLUSIONES

Los resultados demostraron que tanto la proporción de aserrín de cedro como el tamaño de partícula influyen significativamente en la germinación y el crecimiento inicial de maíz (*Zea mays*). Las mezclas con altas concentraciones de aserrín y partículas finas mostraron efectos inhibitorios severos sobre la germinación, la longitud y el peso de las plántulas, mientras que los tratamientos con mayor proporción de suelo y partículas más gruesas favorecieron el desarrollo radicular y aéreo.

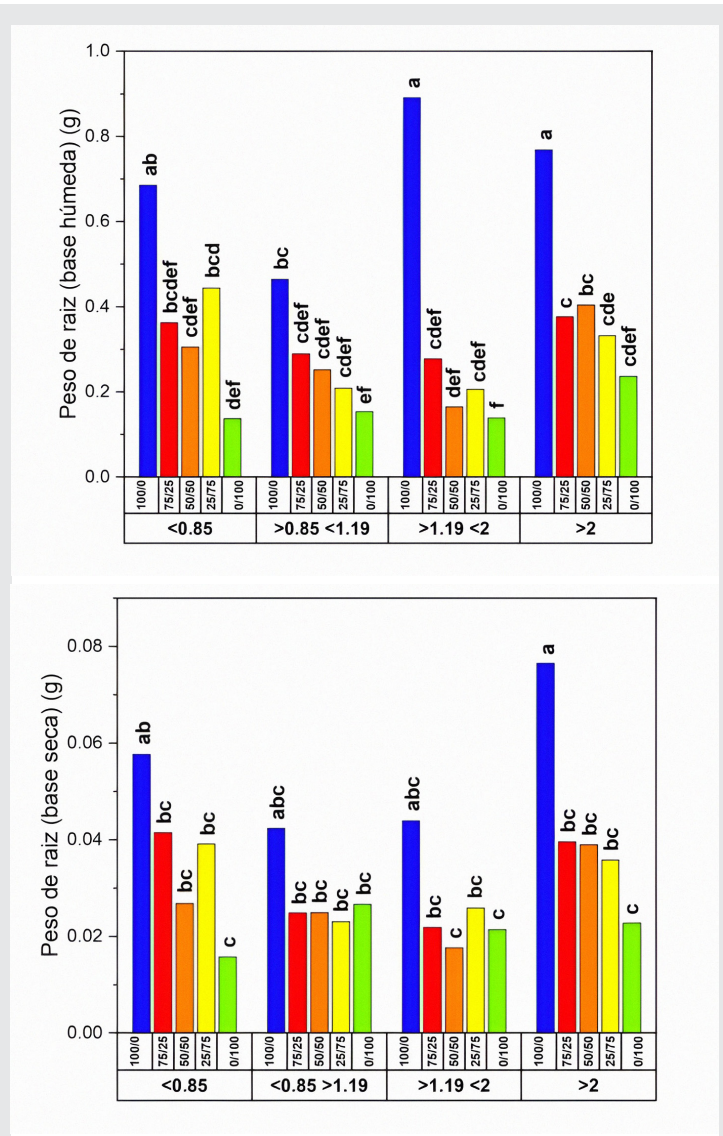


Figura 5: Gráfica de barras para el peso promedio de raíz de plántulas de maíz (*Zea mays*) en función de la interacción entre la proporción de aserrín de cedro/tierra y el tamaño de partícula en base húmeda (panel superior) y base seca (panel inferior). En el eje de las abscisas se indican la proporción de la mezcla aserrín/tierra (números verticales), así como los intervalos del tamaño de partícula del aserrín de cedro: <0.85 mm; 0.85–1.18 mm; 1.19–2.00 mm y >2.00 mm (números horizontales). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados sugieren que la deposición de residuos del aserrín de cedro al aire libre libera compuestos alelopáticos y modifica las propiedades físicas del sustrato, limitando el establecimiento temprano del maíz.

BIBLIOGRAFÍA

[1] García Fernández, E., & Sánchez Sánchez, O. (2016). *El lujo de la muerte (El cedro en peligro)*.

[2] García Santamaría, L. E., Fernández Lambert, G., Mayett Moreno, Y., Alarcón Ruíz, T., & Parra Hernández, N. A. (2023). Cadenas rurales de suministro para la producción de muebles de madera en Misantla, Veracruz. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 14(78), 58-86.

[3] Yasin, M., Noorani, H., Anwar, F., Siddiqui, M., Safdar, M. E., & Andreasen, C. (2022). Non-composted chinaberry (*Melia azedarach* L.) sawdust mixtures as growth medium for okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). *Agriculture*, 12(3), 354.

[4] Olympios, C. M. (1992, March). *Soilless media under protected cultivation rockwool, peat, perlite and other substrates*. In *Symposium on Soil and Soilless Media under Protected Cultivation in Mild Winter Climates* 323 (pp. 215-234).

[5] Yasin, M.; Jabran, K.; Afzal, I.; Iqbal, S.; Nawaz, M.A.; Mahmood, A.; Asif, M.; Nadeem, M.A.; Rahman, Z.U.; Adnan, M.; et al. *Industrial sawdust waste: An alternative to a soilless substrate for garlic (*Allium sativum* L.)*. *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants* 2020, 18, 100252.

[6] Horisawa, S.; Sunagawa, M.; Tamai, Y.; Matsuoka, Y.; Miura, T.; Terazawa, M. *Biodegradation of non-lignocellulosic substances II: Physical and chemical properties of sawdust before and after use as artificial soil*. *J. Wood Sci.* 1999, 45, 492-497.

[7] Scavo, A., Abbate, C., & Mauromicale, G. (2019). *Plant allelochemicals: Agronomic, nutritional and ecological relevance in the soil system*. *Plant and Soil*, 442(1), 23-48.

[8] Allison, F. E., DeMar, W. H., & Smith, J. H. (1963). *Toxicity to Garden Peas of Certain Finely Ground Woods and Barks Mixed with Soil* 1. *Agronomy Journal*, 55(4), 358-360.

[9] da SILVA, J. A. T., Karimi, J., Mohsenzadeh, S., & Dobranszki, J. (2015). *Allelopathic potential of select gymnospermous trees*. *Journal of Forest and Environmental Science*, 31(2), 109-118.

[10] Céspedes, C. L., Calderón, J. S., Salazar, J. R., Lotina-Hennsen, B., & Segura, R. (2001). *Plant-growth inhibitory activity of cedrelanolid from Cedrela salvadorensis*. *Journal of chemical ecology*, 27(1), 137-149.

[11] Cheng, B. *Systems: Sawdust as a greenhouse growing medium*. *J. Plant Nutr.* 1987, 10, 1437-1446.

[12] Mendoza, Lainey E. Ms., "Allelopathy of Western Red Cedar, Douglas Fir, and Western Hemlock on seed germination" (2025). *Honors Projects*. 236. <https://digitalcommons.spu.edu/honorsprojects/236>

[13] Waddington, D. V., Lincoln Jr, W. C., & Troll, J. (1967). *Effect of Sawdust on the Germination and Seedling Growth of Several Turfgrasses* 1. *Agronomy Journal*, 59(2), 137-139.

[14] Nogueira, T. S. R., Passos, M. D. S., Nascimento, L. P. S., Arantes, M. B. D. S., Monteiro, N. O., Boeno, S. I. D. S., ... & Curcino Vieira, I. J. (2020). *Chemical compounds and biologic activities: A review of Cedrela genus*. *Molecules*, 25(22), 5401.

[15] Pinto, R., Cardoso, P., Carneiro, B., Pinto, G., Bedia, C., & Figueira, E. (2025). *Maize Crops Under Rising Temperatures: Bacterial Influence on Biochemical and Lipidomic Changes Induced by Heat*. *Plants*, 14(16), 2593.

[16] Bhat, S. A., Qadri, S. A. A., Dubbey, V., Sofi, I. B., & Huang, N. F. (2024). *Impact of crop management practices on maize yield: Insights from farming in tropical regions and predictive modeling using machine learning*. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101392.





Tierra,
Medio Ambiente
y Energía

Ingeniantes

Potencial hidroenergético de la microcuenca del río Pixquiac en el estado de Veracruz utilizando Modelos Hidrológicos Distribuidos

RESUMEN: Es una prioridad para México aprovechar las fuentes de energía renovable disponibles, para lo cual, el estado de Veracruz cuenta con un recurso abundante, su energía hidráulica. Se desarrolló un estudio de simulación numérica para estimar el potencial de aprovechamiento minihidráulico para generar electricidad en la microcuenca del río Pixquiac, en la cascada de Calichar del municipio de Coatepec, Ver. Para desarrollar la simulación y el cálculo de escurrimientos, se utilizaron juntamente los sistemas de información geográfica QGIS y Physitel con la herramienta HYDROTEL basada en modelos hidrológicos distribuidos. Se utilizaron bases de datos confiables con registros de 22 años de parámetros y variables de interés, principalmente fisiográficas, geológicas, climáticas, además de uso de suelo y vegetación, dicha información fue obtenida de instituciones gubernamentales mexicanas. Se procesó la información para el periodo de estudio y se obtuvieron 8,035 resultados correspondientes al caudal promedio diario de la microcuenca, cuya media fue de 5.596 m³/s. Al validar los resultados con mediciones realizadas, se obtuvieron parámetros de correlación satisfactorios: un valor de NSE=0.6091, un sesgo absoluto de 0.00706755, R²=0.8026 y KGE=0.801495. Para un mejor aprovechamiento del recurso hidráulico, se propone una operación escalonada de tres turbogeneradores en paralelo de 768 kW, 277 kW y 81 kW, bajo este arreglo produciría una energía eléctrica anual de 2,115 MWh.

PALABRAS CLAVE: Generación minihidráulica, Hydrotel, microcuenca, modelo hidrológico distribuido, Physitel, sistemas de información geográfica.



Colaboración

Juan José Marín Hernández; Jorge Arturo Del Ángel Ramos; Sara Patricia Ibarra Zavaleta; Raúl Alberto López Meraz, Universidad Veracruzana

Fecha de recepción: 18 de octubre de 2024

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2024

Autor de Correspondencia: Juan José Marín Hernández

ABSTRACT: It is a priority for Mexico to take advantage of available renewable energy sources, for which the state of Veracruz has an abundant resource: its hydroelectric power. A numerical simulation was developed to estimate the potential for mini-hydropower generation in the Pixquiac River micro-basin, near the Calichar waterfall in the municipality of Coatepec, Veracruz. The QGIS and Physitel geographic information systems were used to simulate and calculate runoff, along with the HYDROTEL tool based on distributed hydrological models. Reliable databases with 22 years of records of parameters and variables of interest were used, mainly physiographic, geological, and climatic, as well as land use and vegetation data. This information was obtained from Mexican government institutions. The information was processed for the study period, yielding 8,035 results corresponding to the average daily flow rate of the micro-basin, which averaged 5,596 m³/s. By validating the results with measurements carried out, satisfactory correlation parameters were obtained: a value NSE=0.6091, an absolute bias of 0.00706755, R²=0.8026 and KGE=0.801495. For better use of the hydraulic resource, a staggered operation of three turbogenerators in parallel of 768 kW, 277 kW and 81 kW is proposed, under this arrangement it would produce an annual electrical energy of 2,115 MWh.

KEYWORDS: Mini-hydro generation, Hydrotel, micro-basin, distributed hydrological model, Physitel, geographic information systems.

INTRODUCCIÓN

Potencial minihidroeléctrico en México

En los últimos 20 años la capacidad instalada en el sector hidroeléctrico en México prácticamente no ha variado. Esto hace

que la participación de la generación hidroeléctrica en México haya reducido significativamente respecto a otras fuentes renovables como la fotovoltaica y eólica, al pasar de 77.3 % a 44.7 % [1]. Existe una incapacidad financiera del estado mexicano de construir nuevas centrales generadoras de energía (particularmente en grandes hidroeléctricas) para resolver la creciente demanda de electricidad de la población y de la industria. A diciembre de 2021, el 26.5 % de la producción nacional provenía de los PIE. La capacidad hidrológica nacional prácticamente le pertenece a la CFE con una participación del 96 %, el resto la producen los PIE [1].

Por otro lado, México cuenta con un abundante recurso hidráulico concentrado en sus tres grandes vertientes hidrológicas, la del pacífico, la del atlántico y la interior con sus 757 cuencas hidrológicas [2]. Se estima que sólo se aprovecha una cuarta parte del potencial hidroeléctrico nacional, esto principalmente en grandes centrales hidroeléctricas [3].

De las 101 centrales hidroeléctricas con las que cuenta actualmente México con una capacidad total instalada de 12,575 MW, sólo 22 centrales se consideran mini (capacidad total de 55 MW, lo cual representa el 0.4 %) y 10 centrales son de tamaño micro (capacidad total de 3.6 MW, lo cual representa el 0.03 %). El factor de planta promedio se ubica alrededor de 0.40 [4].

Además, de las cuatro regiones hidrológicas más húmedas del país, dos se encuentran en el estado de Veracruz (las regiones Papaloapan 28 y Coatzacoalcos 29). De este modo es de esperarse que Veracruz fuera uno de los estados donde más se aprovechara el potencial hidráulico para la generación de electricidad y sólo se tiene una capacidad instalada de 212 MW, lo cual es menor al 2 % de la capacidad nacional [5].

Son pocos y escuetos los estudios de potencial de generación hidroeléctrica en microcuencas de México, entre ellas, la microcuenca del río Pixquiac y prácticamente inexistentes utilizando MDH.

Modelos hidrológicos distribuidos (mhd)

Los MHD han ganado gran aceptación, especialmente en el análisis de cuencas hidrológicas [6, 7], ya que toman en cuenta la variabilidad espacial y temporal de variables de interés. Son modelos complejos basados en algoritmos robustos de alta precisión, sin embargo, para ejecutarlos se requieren de hardware de alta capacidad. Para el presente estudio se utiliza de manera preliminar SIATL v4 y principalmente HYDROTEL como simuladores de caudales basados en MHD.

Sistemas de información geográfica (SIG)

Para el análisis de cuencas hidrológicas se requiere de datos hidrometeorológicos históricos, como temperatura, humedad, precipitación pluvial, entre otros, los cuales son obtenidos principalmente de estaciones

meteorológicas de la región de estudio. También se pueden obtener mediciones de escorrentías en estaciones hidrométricas. Además, es necesario conocer los relieves del terreno, pendiente, tipo de suelo, tipo de vegetación, entre otros. Aquí es donde los SIG desempeñan un papel muy importante al cargar estos datos en forma de capas de información georreferenciada ya sea en formato raster o vectorial [8].

La integración de MHD con los SIG, se convierte en una herramienta poderosa para el estudio de cuencas hidrológicas [8]. Para el presente estudio se utiliza el SIG PHISYTEL como complemento principal de HYDROTEL y de manera complementaria QGIS para generar mapas de información georreferenciada.

Es necesario aplicar los MDH y SIG para estudiar el comportamiento del recurso hidráulico de cuencas con diversos fines, entre ellos, la generación de electricidad en minihidráulicas, por ejemplo, en el río Pixquiac.

MATERIAL Y MÉTODOS.

Microcuenca de estudio

La región hidrológica Papaloapan (RH28) está formada por la cuenca del río Papaloapan (RH28A) y la cuenca del río Jamapa y otros (RH28B). La cuenca RH28B, está formada por diez subcuencas hidrológicas, entre ellas las subcuencas de los ríos Decozalapa y La Antigua.

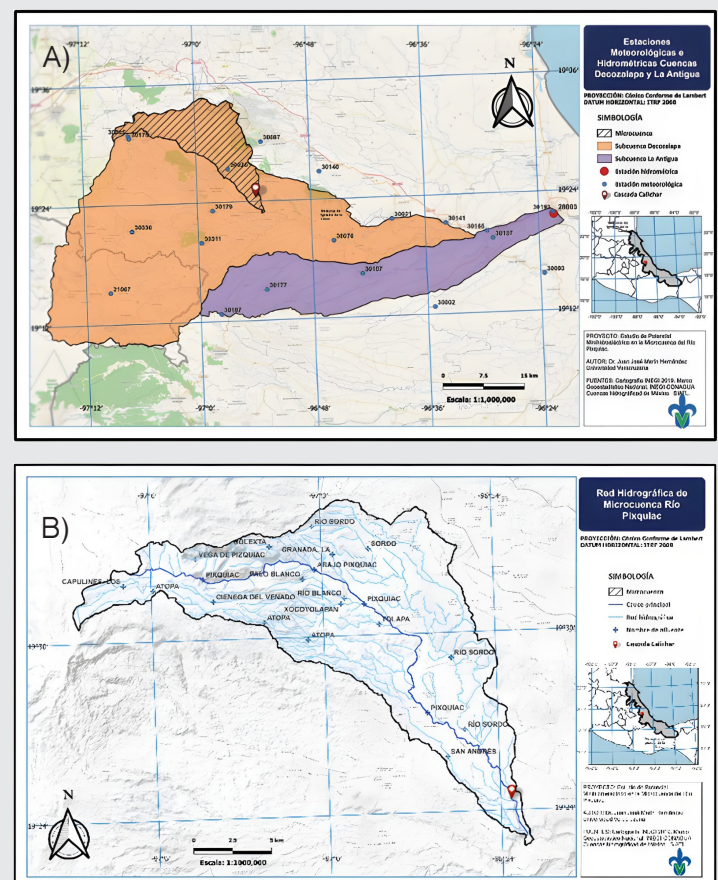


Figura 1. Red hidrológica de las subcuencas del río Decozalapa (A) y Microcuenca del río Pixquiac (B).

El presente estudio se ubica en la cuenca RH28B, perteneciente a la vertiente del Océano Atlántico y que desemboca en el Golfo de México. La subcuenca de interés es la del río Decozalapa ubicada en la región central del Estado de Veracruz [11]. En la Figura 1 (A), se muestran las redes hidrológicas de las subcuencas del río Decozalapa y del río La Antigua. Se toma en cuenta la cuenca del río La Antigua ya que parte de las estaciones hidrometeorológicas necesarias para el estudio se encuentran ubicadas ahí. El área sombreada representa la microcuenca del río Pixquiac de interés.

La subcuenca del río Decozalapa tiene una extensión de 1,622 km² y una pendiente media de 3.03 % que pasa de 3,806 msnm en su elevación máxima a 97 msnm en su elevación mínima, una longitud de la red hídrica 122,513 m y un tiempo de concentración 617.9 min.

Dentro de la subcuenca del río Decozalapa se encuentra la microcuenca del río Pixquiac [11]. Se observa de la Figura 1 (B) que dicha microcuenca está formada por dos corrientes principales, el río Sordo y el río Pixquiac, a su vez formados por diversos afluentes. El cauce principal se muestra por la línea azul oscura. En el último tramo de la vertiente principal de la microcuenca, existe una cascada con al menos 100 m de potencial de altura hidráulica llamada cascada de Calichar, lo cual se potencializa con casi toda la escorrentía de la microcuenca [12]. Se detectó por lo tanto un sitio con un alto potencial para generación minihidráulica.

Dentro de los datos fisiográficos de interés para la microcuenca en estudio, se tiene una longitud en su cauce principal de 39,517 m con un área de 201.3 km² con una pendiente media de 6.13 % debido a que principalmente se encuentra en la sierra madre oriental, con una elevación máxima y mínima de 3,040 m y 617 m respectivamente.

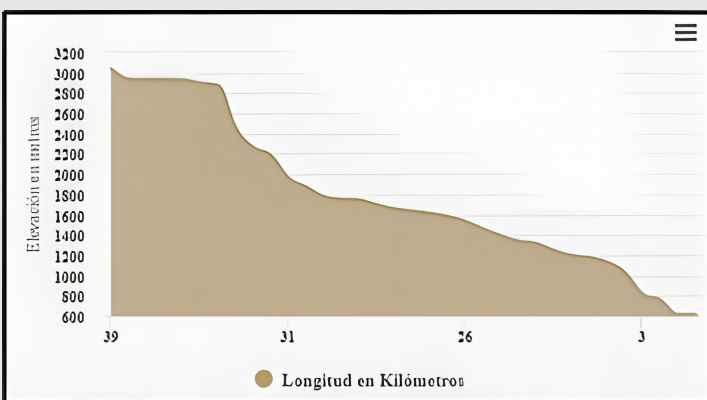


Figura 2. Perfil de elevaciones de cauce principal de microcuenca.

La Figura 2 muestra el perfil de elevaciones del cauce principal de la microcuenca. Destaca que, en un tramo de aproximadamente 5 km, se cuenta con una diferencia de niveles de 1,200 m (de los 5 a los 10 km del inicio

del cauce principal), lo cual representa un potencial de generación hidroeléctrico no abordado en el presente estudio. Además, se observa que al final de la microcuenca en una extensión de río de 3 km se presenta un cambio de elevación de 600m. Es en esta zona donde se encuentra la cascada de Calichar. No se ha encontrado en la literatura especializada un estudio de generación minihidráulica en la microcuenca del río Pixquiac.

Metodología de estudio

Bases de datos consultadas

Para desarrollar el presente estudio se ha realizado una búsqueda exhaustiva de bases de datos confiables obtenidas por diversas dependencias gubernamentales y organizaciones privadas. Los procedimientos de obtención de esta información se tienen bien desarrollados y planificados y están en constante actualización, muchos de ellos tienen registros de décadas.

Las bases de datos consultadas son referentes a áreas como geografía, climatología, topografía, edafología, fisiografía, uso de suelo y vegetación, entre otros.

Son varias las secretarías de estado que se encargan de obtener datos de interés para proyectos de desarrollo en México, como lo son la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), la Secretaría de Economía (SE), la Secretaría de Energía (SENER), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Secretaría de Desarrollo Agrario y Territorial y Urbano (SEDATU), entre otras. Asimismo, trabajan de manera colaborativa con diversos organismos públicos y privados para nutrir sus bases de datos, como lo son universidades y centros de investigación.

Existen organismos como la Comisión Nacional del agua (CONAGUA) cuyas oficinas regionales y comisiones estatales, así como programas como el sistema meteorológico Nacional (SMN) se encargan entre otras cosas de recolectar datos meteorológicos e hidrológicos a lo largo y ancho del país. Asimismo, se obtuvieron datos complementarios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), tiene entre sus funciones normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geografía. Es este instituto es donde converge toda la información estadística nacional proporcionada por las secretarías de estado y es la principal base de datos de la cual se hace uso para el presente estudio.

El INEGI cuenta con el sistema de consulta de espacio y datos de México en su sitio web. Aquí se obtiene información cartográfica georreferenciada en canvas y almacenable en archivos de datos con diferentes extensiones en escalas de 1:1 000 000, 1: 250 000, 1:50

000, 1:20 000 y 1:10 000. Cuenta con recursos como el marco geoestadístico nacional, mapas, imágenes del territorio, marco geodésico, mapoteca, directorio estadístico nacional de unidades económicas (DENUE) e indicadores demográficos, económicos, geográficos y de gobierno, entre otros. [9].

Estaciones meteorológicas e hidrométricas

La Figura 3 muestra las 20 estaciones meteorológicas dentro de la cuenca de los ríos La Antigua y Decozalapa, se obtuvieron datos como temperaturas máximas, medias y mínimas, además de evaporación, precipitación, entre otros. Se buscó una uniformidad aproximada de 50 km en la ubicación de las estaciones meteorológicas. También se observan las estaciones hidrométricas ubicadas en la estación Carrizal (28125) y la estación Cardel (28003).

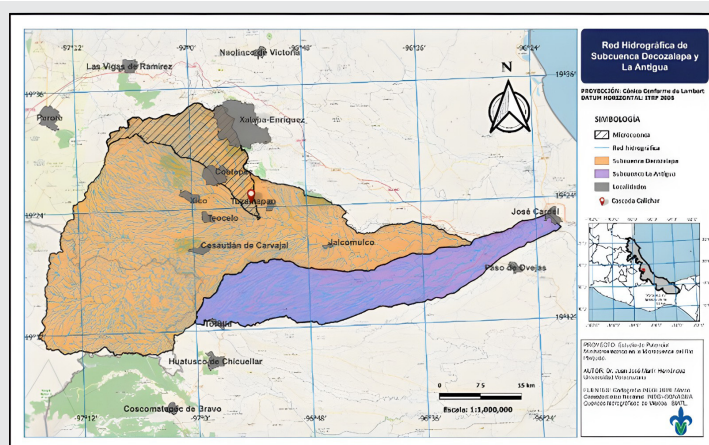


Figura 3. Estaciones hidrometeorológicas de las subcuencas Decozalapa y La Antigua.

Se utilizaron las estaciones mencionadas para alimentar el modelo de simulación en Hydrotel. Todas las estaciones continúan actualmente en operación y cumplen con la normatividad internacional para la obtención y procesamiento de los datos climatológicos.

La única estación hidrométrica que opera actualmente en la cuenca del río La Antigua es la estación Cardel (28003) y cuyas mediciones fueron utilizadas para los procesos de calibración y validación. Sus coordenadas geográficas son latitud 19°21'42" N y longitud 96°22'24" W.

La base de datos meteorológica completa de todas las estaciones de interés fue proporcionada por la CONAGUA a través del SMN, y abarca desde el 1 de enero de 1990 hasta el 31 de diciembre del 2018. Para una mayor actualización, las fuentes oficiales no proporcionan la información completa. Respecto a las estaciones hidrométricas, sólo se cuenta con la información completa hasta el 31 de diciembre del 2011. Por lo tanto, con la finalidad de que el estudio de simulación mediante Hydrotel cuente una mayor confiabilidad, se decide realizarlo del 1 de enero de 1990 hasta 31 de diciembre de 2011, para que cuente con las etapas de calibración y validación en base a mediciones reales de la

estación Cardel. Para estudios más completos, es necesario contar con las bases de datos actualizadas.

Presimulación mediante SIATL v4

La capa hidrológica de la microcuenca de estudio se obtiene del simulador de flujos de agua de cuencas del México desarrollado por el INEGI, llamado SIATL v4. En las funciones de red se selecciona la red hidrográfica aguas arriba del punto seleccionado. Para el presente estudio es la región hidrográfica 28 y dentro de esta se encuentra la subcuenca de Decozalapa (RH28Bg). Se selecciona el punto más cercano a la cascada Calchar y se obtiene la microcuenca de interés, que se llama microcuenca del río Pixiquiac.

En la caja de herramientas, se selecciona la opción de descarga de capas y se abrirá una ventana con los elementos a descargar. Se descargan en formato .shp tres elementos: área de escurrimiento, red hidrográfica y cauce principal que serán procesados en QGIS.

Sistema de información geográfica Physitel

Physitel es un sistema de información geográfica desarrollado en Quebec, Canadá en 1985 por el Instituto Nacional de la Investigación Científica (INRS-EETE, por sus siglas en francés). Physitel prepara la base de datos fisiográfica para Hydrotel, integra información de tipo telemétrica con datos en capas correspondientes a SIG [10]. Primeramente, es necesario el modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés) que define la estructura del drenado de la cuenca en estudio basada en una malla de elevaciones georreferenciadas. Asimismo, es necesario establecer las capas de uso de suelo y tipo de suelo con información tipo raster (satelital) para alimentar el modelo hidrológico distribuido.

Simulación mediante Hydrotel (modelo hidrológico distribuido)

Hydrotel es un modelo hidrológico desarrollado por el INRS-EETE y la Universidad de Quebec. Este modelo se emplea para la simulación y modelación hidrológica distribuida en cuencas fluviales. Hydrotel es un modelo hidrológico distribuido basado en la física de procesos que simula el ciclo hidrológico en una cuenca. Utiliza una representación espacialmente distribuida de la cuenca para capturar las interacciones entre la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, el flujo subsuperficial y la escorrentía superficial. Este modelo permite evaluar el comportamiento hidrológico bajo diferentes escenarios climáticos y de uso de la tierra [10].

Se presentan ejemplos de simulación de flujo utilizando el modelo Hydrotel en varias cuencas ubicadas en Canadá (Quebec, Ontario, Columbia Británica), en el sur de Francia, África Occidental, México, entre otros [13]. Estas simulaciones indican que los diferentes algoritmos del modelo reaccionan de manera efectiva, lo que sugiere su aplicabilidad en cuencas muy diversas bajo condiciones climáticas variadas.

Dentro de las principales aplicaciones de Hydrotel en el ámbito de la modelación hidrológica distribuida se encuentran: 1) Modelación de caudales en una cuenca fluvial; 2) Estudios de inundaciones y riesgos asociados; 3) Gestión del agua y optimización de embalses; 4) Estudios de impacto ambiental y cambio climático; y 5) Estimación de escorrentía y ciclo hidrológico [13]. Podemos observar el gran potencial de Hydrotel para el desarrollo del presente estudio al simular el flujo de agua en una cuenca fluvial, teniendo en cuenta la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración y otros parámetros hidrológicos clave. Esta modelación permite estimar los caudales en diferentes puntos de la cuenca a lo largo del tiempo. Por primera vez se aplica en México un MDH como herramienta para determinar el potencial hidráulico de una microcuenca hidrológica para generación de electricidad en una central minihidráulica.

Calibración y validación del modelo

En el proceso de calibración del modelo se identifican los valores de los parámetros, con el objetivo de mejorar la bondad de ajuste entre la serie temporal de datos simulados y los datos observados. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utiliza una función objetivo. La calibración se realiza mediante un algoritmo de optimización que está vinculado al modelo hidrológico, En este estudio, se utilizó el algoritmo de Búsqueda de Dimensiones Dinámicas (DDB), el cual escala automáticamente el espacio de búsqueda para disminuir el número de evaluaciones del modelo requeridas para alcanzar la región óptima de la función de aptitud de mejor calidad. La calibración fue evaluada por los siguientes indicadores estadísticos: 1) el índice de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe; 2) la relación del error cuadrático medio; 3) El coeficiente de determinación y 4) El porcentaje BIAS [14].

El proceso de validación temporal de un modelo consiste en demostrar que el modelo es capaz de hacer predicciones en un sitio específico para períodos fuera del período de calibración. De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación mostró errores o límites aceptables. La calibración y validación se basó en los datos hidrométricos de una estación de control ubicada a la salida de la cuenca del río estudiado.

La Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE por sus siglas en inglés) dada por la ecuación 1, es comúnmente usada para evaluar el comportamiento de modelos de lluvia y escorrentía. Se define como un "parámetro estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) comparada con la varianza de los datos observados (información) [13].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde \bar{O} es la media de los caudales observados, O_i es el caudal calculado y P_i es el caudal medido, ambos

en el tiempo t . El valor de $NSE=1$ significa que el modelo corresponde perfectamente con los datos observados. El valor de $NSE=0$ significa que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados. Valores de $-1 < NSE < 0$ significa que la media de los valores observados es mejor predictor que los datos simulados.

Otro parámetro estadístico es el $RMSE$ -observaciones de la razón de desviación estándar (RSR) dado por la ecuación 2, el cual se define como la razón de la raíz media del error al cuadrado ($RMSE$ por sus siglas en inglés) y la desviación estándar de los datos observados [10]. El rango de valores que puede tomar RSR es $0 \leq RSR \leq +\infty$ El valor óptimo es de cero, entre más pequeño es RSR implica que el $RMSE$ es bajo y por lo tanto el modelo de simulación se acerca a la realidad.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \right] \quad \text{Ec. (2)}$$

El coeficiente de determinación R^2 dado por la ecuación 3, es un parámetro común utilizado en la estadística descriptiva que define la distribución de la varianza de los datos observados. Su rango de evaluación se encuentra $0 \leq R^2 \leq 1$. Entre más alto el valor del coeficiente de determinación implica un menor error la varianza. Valores de R^2 superiores a 0.5 se consideran aceptables.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right] \quad \text{Ec. (3)}$$

El porcentaje $BIAS$ ($PBIAS$) dado por la ecuación 4, mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o pequeños que sus contrapartes observadas [10]. El valor óptimo de $PBIAS$ es cero. Valores pequeños de $PBIAS$ indican una alta precisión del modelo de simulación. Valores positivos de $PBIAS$ indican una subestimación y valores negativos indican una sobreestimación.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad \text{Ec. (4)}$$

Cálculo de potencia hidroeléctrico

El caudal ecológico dado por normatividad para la región de estudio es del 10 % del caudal de escurrimiento de la microcuenca [15]. Entonces el caudal para generación está dado por la ecuación 5.

$$Q_g = 0.9 Q_c \quad \text{Ec. (5)}$$

Para el cálculo de la potencia teórica se utiliza la siguiente expresión:

$$P_{ins} = \gamma Q_g H_n \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde P_{ins} es la potencia instalada en kW; Q_g es el caudal para generación en m^3/s ; H_n es el salto neto en m;

γ es el peso específico del agua (9.81 kN/m^3). La potencia de salida está dada por la ec. 7.

$$P_{sal} = \eta P_{inst} \quad \text{Ec. (7)}$$

Asimismo η es el factor de eficiencia, a su vez dado por la ecuación 8.

$$\eta = R_t R_g R_s \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde: R_t es el rendimiento de la turbina, R_g es el rendimiento del generador y R_s es el rendimiento del transformador.

Los rendimientos de la turbina, generador y transformador son proporcionados por los fabricantes. Si estos datos son desconocidos se puede considerar como factor de eficiencia un valor entre 0.8 y 0.85 [16].

RESULTADOS

Modelación hidrológica

Se determinaron los caudales medios trimestrales y la desviación estándar para la desembocadura de la microcuenca del río Pixquiac desde el 1 de enero de 1990 hasta el 31 de diciembre del 2011. Se trata de 8,035 resultados correspondientes al caudal promedio diario de la microcuenca de 22 años de información. La media del caudal es de $5.596 \text{ m}^3/\text{s}$ y la desviación estándar media es de 7.7732. Se observa en el ANEXO A, la escorrentía con un comportamiento anual periódico. En la Figura 4 se observa que los primeros dos trimestres son de lluvias escasas, el tercer trimestre es de lluvias intensas (siendo el máximo en el mes de septiembre) y el cuarto trimestre de lluvias medias. También se observa que en ciertos años se presentaron eventos meteorológicos extremos como huracanes, tormentas o depresiones tropicales que influenciaron la zona de estudio en los años 1991, 1992, 1995, 1998, 2000, 2003, 2006, 2010 y 2011; algunos de estos eventos meteorológicos fueron los huracanes Roxane, Mitch, Keith, entre otros; así como las tormentas tropicales Matthew, José y Marco, entre otros. El caudal trimestral máximo se registra en el tercer trimestre de 1996 con un valor de $17.871 \text{ m}^3/\text{s}$ y el mínimo de $0.689 \text{ m}^3/\text{s}$ se presenta en el segundo trimestre de 1999. Asimismo, el día de caudal máximo se presenta el 6 de octubre de 1999 con un valor de $86.774 \text{ m}^3/\text{s}$ y el mínimo se presenta el 18 de junio de 1998 con un valor de $0.464 \text{ m}^3/\text{s}$.

El Anexo A, muestra los hidrogramas de calibración (01/01/1990 a 12/31/1999) y validación (01/01/2000 a 12/31/2009) en m^3/s para la subcuenca del río La Antigua. Se observa que hay una similitud en entre ambos parámetros, sin embargo, para cuantificar el modelo se comparan los valores de caudales obtenidos del proceso de simulación con los caudales medidos en la estación Cardel (28003) por un periodo de 20 años (Tabla 1). Se obtiene un valor de Nash-Sutcliffe Efficiency de 0.6091, el cual podemos considerar como satisfactorio; un sesgo absoluto de 0.007068 muy cercano

al valor ideal de cero; un coeficiente de correlación de 0.8026 que puede considerarse como una fuerte correlación para fenómenos meteorológicos, así como un buen indicador predictivo; y una eficiencia de Kling Gupta de 0.8015, considerada buena.

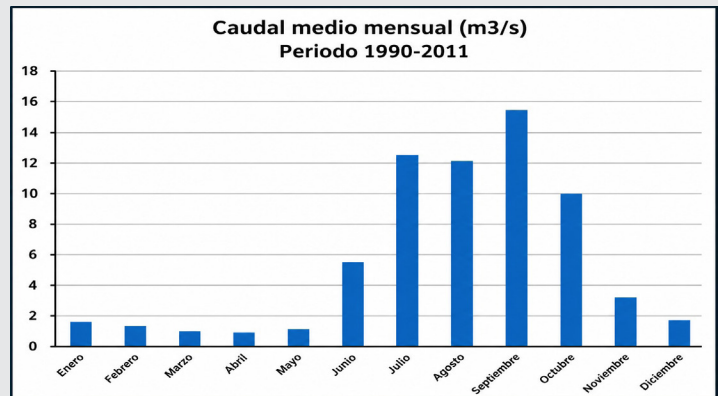


Figura 4. Caudal medio mensual de la microcuenca del río Pixquiac (periodo 1990-2011).

Tabla 1. Calibración y validación de modelo hidrológico.

	Nash-Sutcliffe	Bias relativo	Bias absoluto	R ²	KGE
Calibración	0.71	-0.13	0.13	0.85	0.74
Validación	0.51	0.15	0.15	0.78	0.80

Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de potencia

Para el periodo en estudio, se realiza un proceso de selección de los días que se cumple con el caudal suficiente para garantizar factores de operación (FO) de planta definidos. En la Tabla 2 se muestran cinco factores de operación con sus respectivos valores de caudal que lo garantizan. Para cada FO se muestran el número de días que operaría la planta de los 8,035 días totales correspondientes al periodo de 22 años. Se muestran también el número de días que operaría al año cada turbina.

Tabla 2. Operatividad de planta y caudales asociados.

Factor de operación	0.20	0.31	0.40	0.60	0.80
Caudal de cuenca (m^3/s)	9.210	5.596	3.320	1.590	0.965
Días de operación	1607	2481	3214	4824	6436
Días fuera de operación	6428	5554	4821	3211	1599
Días de operación al año	73	113	146	219	293

Fuente: Elaboración propia.

Debido a malas políticas públicas en México, una gran cantidad de centrales hidroeléctricas en México han operado históricamente de manera subutilizada con un bajo factor de operación de 0.20. El gobierno federal actual, como parte de su política energética realiza inversiones para incrementarlo. El promedio nacional está actualmente alrededor de 0.40. El FO de 0.31 corresponde al caudal promedio durante el periodo de 22 años en la microcuenca de estudio que es de $5.596 \text{ m}^3/\text{s}$. Los valores de FO de 0.60 y 0.80 se proponen como una medida de aprovechar el recurso hidráulico en los días de bajo caudal ($2.154 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.965 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente).

Considerando una altura de potencial hidráulico de 100 m, un factor de planta de 0.85 y los caudales dados en la Tabla 2, se obtiene la Tabla 3 correspondiente a potencia instalada y energía eléctrica anual generada. Se observa de la Tabla 3, que la potencia de generación para el caudal máximo de diseño es de 6,912 kW el cual operaría durante 73 días al año y produciría una energía de 12,117 MWh; para un caudal promedio de la microcuenca de 22 años de 5.596 m³/s se produciría una potencia de 4,200 kW durante 113 días y una energía anual generada de 11,367 MWh; para un caudal de 3.320 m³/s que posiciona a la central hidroeléctrica propuesta en la media del FU nacional, se produciría una potencia de 2,492 kW durante 146 días para una energía anual de 8,736 MWh; asimismo, para un mejor aprovechamiento del recurso hidráulico durante la época de estiaje se propone operar la planta durante 219 días al año (FO 0.6) con una disponibilidad de caudal de 1.590 m³/s, lo cual produciría una potencia de 1,617 kW para una energía anual de 6,280 MWh; para un FO de 0.8 (293 días de operación) y una disponibilidad de caudal de 0.965 m³/s, se produciría una potencia de 724 kW para una energía anual de 5,085 MWh.

Tabla 3. Potencia instalada y energía eléctrica generada.

FO	Q _c (m ³ /s)	Q _g (m ³ /s)	P _{sal} (kW)	E _{anual} (MWh)
0.20	9.210	8.289	6,912	12,117
0.31	5.596	5.036	4,200	11,367
0.40	3.320	2.988	2,492	8,736
0.60	1.590	1.431	1,617	7,086
0.80	0.965	0.869	724	5,085

Fuente: Eleboración propia.

Podría ser tentador considerar que la mejor opción es la primera (FO=0.2) ya que se tendría la mayor potencia instalada de 6,912 kW y la mayor energía anual producida de 12,117 GWh, aunque este arreglo sólo operaría 73 días al año. Por otro lado, se pudiera pensar que lo mejor sería que la central operara la mayor cantidad de días al año (FO=0.8), es decir, tener una potencia instalada de 724 kW, lo cual produciría una energía anual de sólo 5,085 MWh. En lugar de elegir un sistema con un solo turbogenerador, se propone instalar varias turbinas de diferentes capacidades con la finalidad de aprovechar el recurso hidráulico de acuerdo con su disponibilidad de mayor a menor. Para el presente estudio, se propone la operación de tres turbogeneradores Francis, uno de 6,912 kW, otro de 2,492 kW y uno de 724 kW. Cuando caudal disponible sea igual o superior a 9.210 m³/s se operaría el turbogenerador de 6,912 kW; asimismo, cuando el caudal disponible se encuentre entre 3.320 y 9.210 m³/s se operaría el turbogenerador de 2,492 kW; y cuando el caudal disponible se encuentre entre 0.965 y 3.320 m³/s se operaría el turbogenerador de 724 kW. Bajo este arreglo se sumarían la energía eléctrica anual de los tres casos, es decir se producirían 19,030 MWh. De esta forma la central hidroeléctrica operaría 293 días al año.

Para definir la viabilidad para la construcción de la planta propuesta, es necesario realizar a detalle todos los estudios técnicos, económicos, sociales y de impacto social basados en normatividad.

CONCLUSIONES

A partir del uso de un proceso de simulación numérica mediante el software Hydrotel, utilizando MHD y SIG como SIATL v4 y Physitel en la microcuenca del río Pixquiac, se obtienen 8,035 resultados de caudales promedios diarios de sus principales ramales, cuyo caudal promedio diario durante un periodo de 22 años (1 de enero de 1990 hasta el 31 de diciembre del 2011) es de 5.596 m³/s, con una desviación estándar media es de 7.7732. Se recomienda extender el periodo de estudio a fechas recientes con la finalidad de tener una mayor certidumbre en los resultados.

Durante los 22 años del periodo estudiado en la microcuenca del río Pixquiac, se observa claramente un comportamiento periódico anual, donde la época de estiaje abarca de noviembre a mayo y la época de lluvias se presentan de junio a octubre, con las lluvias más intensas en el mes de septiembre.

Se obtienen indicadores estadísticos satisfactorios que evalúan el desempeño de la calibración y validación del MHD, calculado a partir de series temporales diarias, en la cuenca del río La Antigua.

Se evalúan cinco condiciones de operación definidas por sus factores de operación de planta con valores de 0.2, 0.31, 0.40, 0.50 y 0.8 con caudales disponibles de 9.210, 5.596, 3.320, 1.590 y 0.965 m³/s respectivamente y número de días de operación al año de 73, 113, 146, 219 y 293 días respectivamente. La potencia de los turbogeneradores para cada caso es de 6,912, 4,200, 2,492, 1,193 y 724 kW respectivamente y la energía eléctrica anual producida sería de 12,117; 11,367; 8,736; 6,280 y 5,085 MWh respectivamente.

Para un mejor aprovechamiento del recurso hidráulico, se propone instalar tres turbogeneradores en paralelo de 6,912 kW, 2,494 kW y 724 kW, para así desarrollar una generación eléctrica anual de 19,030 MWh durante 293 días al año (FO=0.8).

Como lo demuestra este estudio que existe un potencial de minigeneración de electricidad en la microcuenca del río Pixquiac la altura de la cascada de Calichar. Asimismo, debido a las características, de las cuencas hidrográficas del Estado de Veracruz y de otras zonas de México, es probable hallar otros sitios potenciales de generación eléctrica a partir de minihidráulicas, que en su conjunto pudieran representar una importante participación de energía hidráulica para el país.

Se recomienda realizar los estudios técnicos y económicos que pudieran justificar la viabilidad de la cons-

trucción y operación de la central minihidroeléctrica de Calichar.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Secretaría de Energía SENER (2022). Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional PRO-DESEN 2022-2026.

[2] Comisión Nacional del Agua (2015). Atlas del agua en México. México.

[3] Palacios Fonseca A.A., Peña García N., y Cervantes Carretero E.A. (2018). Memorias del primer simposio: Retos y oportunidades de la generación hidroeléctrica en México. Primera edición. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. Morelos, México.

[4] Palacios Fonseca A.A., Peña García N., y Cervantes Carretero E.A. (2017). Primera parte: Infraestructura hidroeléctrica actual. Primera edición. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. Morelos, México.

[5] Palacios Fonseca A.A., Peña García N., y Cervantes Carretero E.A. (2017). Segunda parte: Posibilidades de desarrollo hidroeléctrico en México. Primera edición. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA. Morelos, México.

[6] Chen, Y. (2018). Distributed Hydrological Models. Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3_23-1.

[7] Bhumi Raj B. et.al. (2025). Evaluation of distributed and semi-distributed hydrological models in complex River Basin system, Nepal. HydroResearch, Vol. 8, pp 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.09.006>

[8] Zhang, X. and Srinivasan, R. (2009). GIS-based spatial precipitation estimation: a comparison of geostatistical approaches. Journal of the American Water Resources Association, vol. 45, no.4, pp. 894-906.

[9] Datos de consulta INEGI (2026). <http://www.inegi.org.mx/siscon/>

[10] Iqbal, Z., Shahid, S., Ismail, T., Sa'adi, Z., Farooque, A. and Yaseen, Z.M. (2022). Distributed Hydrological Model Based on Machine Learning Algorithm: Assessment of Climate Change Impact on Floods. Sustainability. 14:6620. <https://doi.org/10.3390/su14116620>.

[11] Pérez Luna, G. (2015). Modelación hidrológica continua para fines de pronóstico de avenidas en ríos.

[12] Instituto Nacional de Geografía e Informática INEGI (2018). Tutorial quantum GIS v. 3.4 Madeira. Dirección de Geografía. DRCN San Luis Potosí.

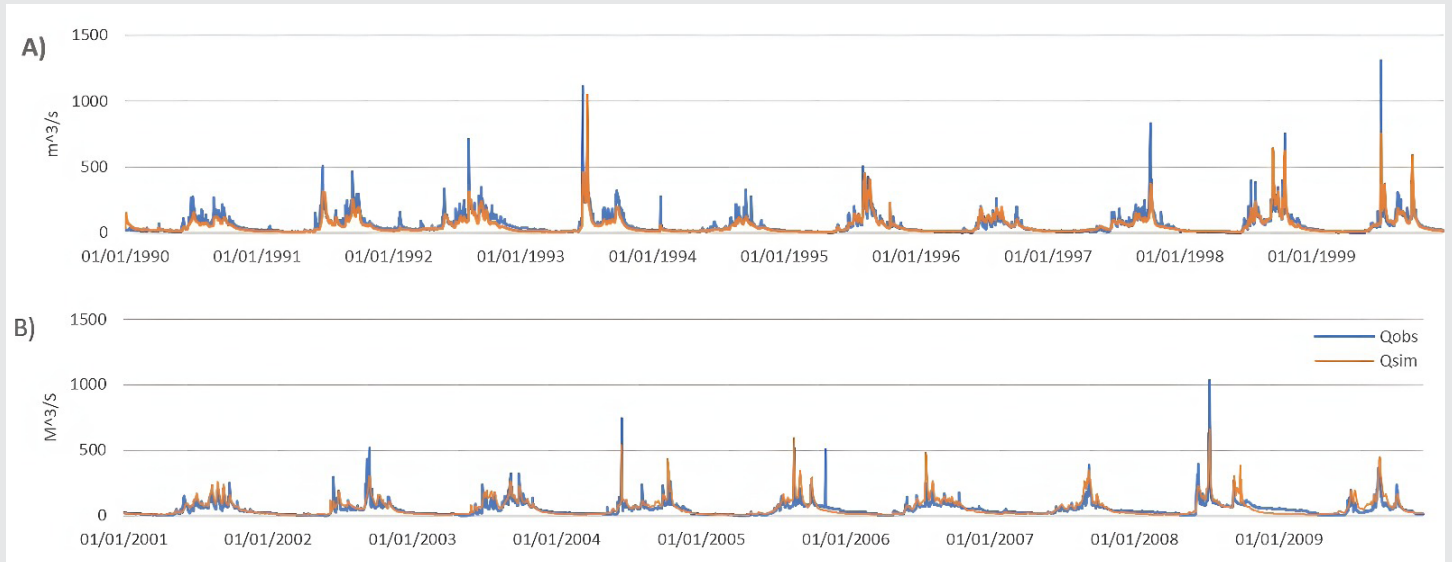
[13] Ibarra Zavaleta, S.P., Landgrave, R., Romero López, R., Poulin, A., and Arango Miranda, R. (2017). Distributed hydrological modeling: Determination of theoretical hydraulic potential and streamflow simulation of extreme hydrometeorological events, Water, vol. 9, no.8, pp. 602-618.

[14] Coy Murcia, L.C. (2017). Ajuste y validación del modelo precipitación - escorrentía GR2M aplicado a la subcuenca nevado. Repositorio institucional. Universidad Santo Tomás.

[15] Norma Mexicana. NMX-AA-159-SCFI-2012. (2012). Procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.

[16] Islas, N.A. (2018). Estudio de potencial de aprovechamiento hidráulico para la generación de Electricidad de la cascada de Calichar del municipio de Coatepec. Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana. Xalapa, México.

Anexo A. Hidrograma de diario A) calibración y B) validación para la estación hidrométrica de control Cardel (28003).





Calidad

y

Sistemas de Manufactura

Ingeniantes

Gestión de RPBI en hospitales privados: revisión narrativa estructurada de la brecha entre norma y práctica



Colaboración

Gerardo Isaac Gómez Lara; Javier Guzmán Obando; Nora Hilda González Durán; Juan Carlos Guzmán García, Universidad Autónoma de Tamaulipas; Saúl Santiago Cruz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 27 de mayo de 2025

Fecha de aceptación: 29 de mayo de 2026

Autor de Correspondencia: Javier Guzmán Obando

RESUMEN: La gestión de residuos peligrosos biológico-infecciosos en hospitales privados es un desafío prioritario para la seguridad sanitaria y ambiental. En este estudio, el objetivo es analizar, mediante una revisión narrativa estructurada, los procesos de clasificación, recolección, almacenamiento, transporte y disposición de estos residuos, identificando las brechas entre la normativa vigente y su aplicación operativa. Se empleó un enfoque cualitativo, descriptivo y no experimental, con búsqueda en bases académicas y literatura técnica institucional en español e inglés (2010-2025), bajo criterios explícitos de inclusión y exclusión, y síntesis por ejes analíticos. Los resultados muestran una implementación parcial de la normatividad, así como una insuficiente estandarización de protocolos visibles en el punto de generación, y además, capacitación intermitente y tercerización sin control mediante indicadores, lo cual afecta la trazabilidad y eleva el riesgo ocupacional. Se concluye, que la brecha entre la normativa y la práctica persiste y demanda supervisión efectiva, auditorías, estandarización de procesos, fortalecimiento de capacidades y una cultura organizacional orientada a la seguridad, sostenibilidad y la responsabilidad compartida.

PALABRAS CLAVE: RPBI, Gestión de RPBI, Trazabilidad, Protocolos operativos, Auditoría interna, Hospitales privados.

ABSTRACT: The management of biologically infectious hazardous waste in private hospitals is a priority challenge for health and environmental safety. In this study, the aim is to analyze, through a structured narrative review, the processes of classification, collection, storage, transportation, and disposal of this waste, identifying the gaps between current regulations and their operational implementation. A qualitative, descriptive, and non-experimental approach was used, with searches in academic databases and institutional technical literature in Spanish and English (2010-2025), following explicit inclusion and exclusion criteria, and synthesis by analytical themes. The results show partial implementation of regulations, as well as insufficient standardization of protocols at the point of generation, along with intermittent training and outsourcing without monitoring through indicators, which affects traceability and increases occupational risk. It is concluded that the gap between regulations and practice persists and requires effective supervision, audits, process standardization, capacity building, and an organizational culture focused on safety, sustainability, and shared responsibility.

KEYWORDS: BHW, Management of Biological-Infectious Hazardous Waste, Traceability Operational Protocols, Internal Audit, Private Hospitals.

INTRODUCCIÓN

En el contexto hospitalario, la gestión de los Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos (RPBI) representa un desafío constante, especialmente en el sector privado, donde la normativa convive con realidades operativas diversas. Este trabajo de investigación surge de la necesidad de comprender cómo se está aplicando la normativa vigente, específicamente la NOM-087-ECOL-SSA1-2002 (NOM-087) y qué tan alineada está con

estándares internacionales como los propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (OSHA siglas en inglés); aunque existen lineamientos claros, su implementación práctica suele estar llena de matices, brechas y oportunidades de mejora.

En México, la Norma Oficial Mexicana (NOM) establece los lineamientos técnicos para el manejo de RPBI, incluyendo su clasificación, envasado, recolección, transporte y disposición final [1]. Sin embargo, diversos estudios han evidenciado que su implementación práctica presenta algunas inconsistencias, especialmente en el sector privado. Esta situación contrasta con los marcos regulatorios internacionales, los cuales incorporan enfoques más integrales que incluyen sostenibilidad, trazabilidad digital y fiscalización activa [2, 3].

La gestión de los RPBI en hospitales privados constituye un componente esencial para la seguridad sanitaria y la protección ambiental. En México, la normativa vigente establece lineamientos específicos para su clasificación, recolección y disposición final; sin embargo, su aplicación práctica suele presentar variaciones significativas entre instituciones, especialmente en el sector privado, donde los modelos operativos, los niveles de supervisión y los mecanismos de control pueden diferir ampliamente. Estas diferencias generan riesgos que afectan tanto al personal de salud como al entorno hospitalario, lo que convierte este tema en un área prioritaria de análisis.

A nivel internacional, se han desarrollado enfoques más integrados que incorporan sistemas de trazabilidad digital, auditorías operativas y modelos de economía circular para fortalecer la gestión de residuos sanitarios. Estas estrategias contrastan con las prácticas observadas en numerosos hospitales privados mexicanos, donde persisten desafíos relacionados con la falta de protocolos estandarizados, una capacitación intermitente del personal, la rotación frecuente de trabajadores y la dependencia de servicios tercerizados sin mecanismos concretos de supervisión. Esta situación no solo afecta la eficiencia del proceso, sino que también impide consolidar una cultura institucional de bioseguridad.

Estudios recientes realizados en clínicas privadas han demostrado que las carencias en la segregación, el almacenamiento y la capacitación del personal están relacionadas con un aumento en el riesgo ocupacional y la ocurrencia de eventos nosocomiales. Por otro lado, la implementación de protocolos y la formación continua contribuyen de manera significativa a disminuir la incidencia de infecciones asociadas con el manejo de residuos en hospitales [4].

A escala internacional, la literatura más reciente señala que avanzar hacia una gestión sostenible exige integrar principios de economía circular, gobernanza y control

operativo permanente, ya que los sistemas que incorporan circularidad y seguimiento continuo logran mayor resiliencia y mejor alineación entre regulación y práctica, aunque advierten barreras regulatorias y operativas para su adopción [5].

Existen estudios que analizan comparaciones internacionales o describen diagnósticos puntuales [5], pero son escasos los trabajos que integran de manera sistemática los enfoques normativos, operativos y organizacionales que convergen en la gestión de los RPBI. Este vacío limita la comprensión del fenómeno y, en consecuencia, reduce la posibilidad de diseñar estrategias de mejora contextualizadas.

Ante el panorama presentado anteriormente, el problema de investigación se define de la manera siguiente: existe una brecha entre lo que establece la normativa mexicana sobre la gestión de RPBI y la manera en que las instituciones privadas llevan a cabo los procesos operativos asociados; la cual no ha sido suficientemente descrita ni explicada desde un análisis integral que contemple dimensiones técnicas, organizacionales y de gobernanza. Esta falta de alineación dificulta la implementación de prácticas homogéneas y seguras, lo cual limita la capacidad institucional para enfrentar los riesgos sanitarios vinculados a un manejo inadecuado de los residuos.

Debido a lo anteriormente descrito, el presente estudio busca abordar el vacío mediante una revisión narrativa estructurada que permita analizar críticamente la gestión de los RPBI en hospitales privados, identificar las principales brechas entre la regulación y la práctica y reconocer oportunidades de mejora basadas en experiencias documentadas. El propósito es contribuir a la toma de decisiones institucionales y al fortalecimiento de estrategias de bioseguridad que respondan de manera más eficiente a las necesidades reales del contexto hospitalario privado.

Antecedentes

La gestión de los RPBI ha sido reconocida como una prioridad en los sistemas de salud debido a los riesgos que representan para el personal médico, los pacientes y el medio ambiente. En México, la NOM-087 establece los lineamientos técnicos para el manejo de residuos peligrosos biológico-infecciosos; sin embargo, su aplicación práctica ha mostrado inconsistencias, particularmente en hospitales donde la gestión depende de múltiples actores. En lo que respecta a la fragmentación institucional y la tercerización del servicio de recolección, obstruyen el cumplimiento efectivo de la normativa, esto al tener vacíos de responsabilidad y de supervisión [6].

A pesar de la existencia de la normativa, establecimientos de salud carecen de protocolos estandarizados y de personal capacitado para la correcta separación,

recolección y disposición de los RPBI. Esta situación genera una brecha significativa entre la regulación y su implementación sobre la importancia de los recursos humanos en salud (RHUS) en calidad de los servicios sanitarios ya sea en el sector público o privado [7].

Desde un ámbito comparativo, ha analizado la gestión de residuos hospitalarios entre México, Suiza y Francia, llegando a la conclusión de que los países europeos cuentan con marcos regulatorios formales, una fiscalización activa y una cultura organizacional orientada al cumplimiento [6]. A diferencia con México, la gestión de RPBI tiene una logística poco eficiente y esto se debe a la voluntad institucional.

En contraste, con países como el Reino Unido, el enfoque ha evolucionado hacia modelos de gestión más sostenibles e innovadores. La estrategia nacional del Servicio Nacional de Salud del Reino Unido (NHS) promueve la trazabilidad digital, la reducción en la fuente y la economía circular como pilares para una gestión eficiente de residuos clínicos [8]. Dentro de sus proyectos no solamente se estudia el tema de los residuos, sino también, trabajan por utilizar recursos de manera efectiva, que permitan alcanzar el objetivo de cero emisiones netas de carbono para el 2040 [8].

Por lo anteriormente descrito, este análisis comparativo entre el contexto mexicano y los estudios internacionales ponen de manifiesto el fortalecer el marco normativo nacional, la capacidad de fiscalización y el trabajar con la tecnología.

En el presente trabajo de investigación se propone contribuir a ese esfuerzo, mediante un análisis bibliográfico que reconozca áreas de oportunidad, registre buenas prácticas y proponga líneas de acción para mejorar la gestión de RPBI en hospitales privados.

Objetivo general

Analizar, mediante una revisión narrativa estructurada, la gestión de los RPBI en hospitales privados, con el propósito de identificar y explicar las brechas entre la normativa vigente y su aplicación operativa, considerando las dimensiones normativa, operativa y organizacional que intervienen en el proceso.

Objetivos particulares

- Revisar la literatura científica y normativa nacional e internacional relacionada con la gestión de RPBI en hospitales privados.
- Identificar y describir los enfoques, modelos y prácticas documentadas en los procesos de clasificación, recolección, almacenamiento, transporte y disposición de RPBI.
- Examinar la correspondencia entre la normativa mexicana—particularmente la NOM-087-ECOL-SSA1-2002—y las prácticas operativas reportadas en hospitales privados.

- Analizar las brechas de conocimiento, los desafíos operativos y los riesgos sanitarios asociados al manejo inadecuado de los RPBI desde las dimensiones normativa, operativa y organizacional.
- Proponer líneas de acción e implicaciones derivadas de la evidencia bibliográfica que contribuyan al fortalecimiento de la gestión de RPBI en establecimientos hospitalarios privados.

Justificación

La adecuada gestión de los RPBI es crítica para la seguridad sanitaria y ambiental en los establecimientos hospitalarios; en el sector privado, este reto se acentúa por la necesidad de asegurar trazabilidad operativa y capacitación continua del personal.

En América Latina, persiste un manejo insuficiente de residuos en el ámbito hospitalario, con implicaciones sanitarias y ambientales relevantes [9]. Además, en el contexto mexicano se han documentado debilidades institucionales que dificultan la estandarización de protocolos, la estabilidad del personal y la consolidación de una cultura de bioseguridad [6].

Las experiencias internacionales muestran que enfoques como la trazabilidad digital, la segregación avanzada y la economía circular contribuyen a mejorar el desempeño operativo y la rendición de cuentas [8]; su adaptación contextual ofrece oportunidades concretas para el sector privado en México. En paralelo, la disponibilidad y formación de recursos humanos incide directamente en la calidad de los servicios sanitarios y en la adherencia a protocolos [7].

En este marco, el estudio se justifica por su aporte analítico y aplicado: explica la brecha entre norma y práctica desde dimensiones normativa, operativa y organizacional, y orienta decisiones institucionales para fortalecer estandarización, trazabilidad y supervisión con base en evidencia.

Fundamentación teórica

La gestión de los RPBI constituye un eje fundamental en la seguridad sanitaria y ambiental de los establecimientos de salud. Su manejo inadecuado puede generar riesgos significativos para el personal médico, pacientes, visitantes y el entorno, especialmente en hospitales privados donde los modelos operativos y el cumplimiento normativo pueden variar ampliamente.

En estudios recientes [10], se ha señalado que la falta de estandarización en los procesos de gestión de residuos hospitalarios y la escasa capacitación del personal incrementan los riesgos de exposición y comprometen la seguridad institucional; además, se han identificado estas deficiencias como factores críticos que afectan la eficacia del sistema de manejo de residuos en centros de salud.

Teóricamente, el manejo de RPBI se enmarca en el enfoque de gestión integral de residuos, el cual promueve la minimización de riesgos desde el punto de generación hasta su disposición final. Este enfoque se apoya en principios como la bioseguridad, la trazabilidad, la responsabilidad compartida y la mejora continua.

En el contexto de los hospitales privados, la literatura científica ha abordado temas como la capacitación del personal, la disponibilidad de insumos adecuados (contenedores, etiquetas, señalización), la infraestructura hospitalaria y la tercerización de servicios. Existe una separación en los enfoques, las limitaciones en la documentación de casos y escasa sistematización de buenas prácticas, esta falta de sistematización dificulta la generación de modelos replicables y limita la posibilidad de establecer estándares de calidad en la gestión de RPBI [10]. Por lo tanto, es fundamental realizar una revisión completa de la literatura sobre el estado actual del tema para identificar tendencias, carencias en el conocimiento, desafíos recurrentes y soluciones innovadoras en la administración de RPBI en hospitales privados.

Estado del Arte

Enfoque normativo

La gestión normativa de los RPBI en México se encuentra regulada por la NOM-087, que establece los lineamientos técnicos para la clasificación, envasado, almacenamiento, recolección, transporte y disposición final de estos residuos; la cual es de cumplimiento obligatorio para todos los establecimientos generadores de RPBI, tanto públicos como privados.

En contraste, organismos internacionales como la OMS y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) han promovido un enfoque integral y sostenible. Por ejemplo, su informe más reciente destaca la disminución de los residuos desde la fuente, implementar tecnologías limpias y garantizar la trazabilidad en los establecimientos de salud, como parte de un sistema resiliente de agua, saneamiento, higiene y gestión de residuos [2].

Desde una perspectiva comparativa, en [6] se analizó la gestión de residuos hospitalarios en México, Suiza y Francia; concluyendo que los países europeos cuentan con marcos regulatorios más robustos, fiscalización activa y una cultura organizacional orientada al cumplimiento. En México, en cambio, la normativa existe, pero su aplicación depende en gran medida de la voluntad institucional, lo que genera una logística hospitalaria fragmentada y poco eficiente.

El sistema de salud en el Reino Unido sigue reglas que combinan el cuidado del medio ambiente, el rastreo digital de los productos y la reutilización de recursos. El documento técnico HTM 07-01 del NHS proporciona

directrices específicas para la gestión segura de residuos clínicos, promoviendo prácticas como la segregación avanzada, auditorías internas y el uso de tecnologías digitales para el monitoreo, lo que ha contribuido a reducir riesgos sanitarios y ambientales en sus establecimientos de salud [8].

Enfoque operativo

La gestión operativa de los RPBI constituye el núcleo funcional del sistema hospitalario en lo que respecta a bioseguridad. Su implementación efectiva depende de factores como la capacitación del personal, la existencia de protocolos estandarizados y la supervisión por parte de las instituciones. Al evaluar este aspecto permite detectar cuellos de botella logísticos y áreas con potencial para mejorar, lo cual tiene un efecto directo en la seguridad dentro del entorno hospitalario.

En estudios realizados en [11], se advierte que la gestión inadecuada de residuos hospitalarios, especialmente la falta de segregación en el punto de origen y la escasa capacitación del personal incrementa los riesgos de exposición a agentes infecciosos y dificulta el tratamiento seguro de los residuos, particularmente en países con recursos limitados.

En el contexto latinoamericano, se ha desarrollado una herramienta para evaluar la gestión de residuos hospitalarios en una clínica de alta complejidad en Cali, Colombia [10]. Su estudio evidenció que la falta de auditorías internas, el escaso control sobre la tercerización del servicio de recolección y la ausencia de indicadores de desempeño dificultaban la eficacia del sistema. Además, concluyeron que la operación logística de los residuos no depende únicamente de la infraestructura, sino también del compromiso institucional para supervisar y corregir desviaciones.

En México, en la región Cuitzeo, Michoacán, se analizó el manejo de residuos peligrosos, encontrando que el conocimiento técnico y normativo del personal generador influye directamente en la disposición a pagar por una gestión ambientalmente adecuada [12]. Sus hallazgos revelan que, aunque muchos generadores conocen sus obligaciones legales, persisten prácticas inadecuadas como la disposición de residuos peligrosos como si fueran residuos sólidos urbanos. Esto refuerza la necesidad de integrar la capacitación y el cumplimiento normativo como parte estructural de la operación institucional; el tener un protocolo por parte del personal operativo es clave para garantizar una gestión segura y eficiente.

En un análisis bibliométrico se destaca que uno de los principales desafíos operativos en la gestión de RPBI es la falta de estandarización en la clasificación y manejo de los residuos, tanto a nivel nacional como internacional [13]. Se hace énfasis que, mientras por un lado se propone una clasificación amplia que incluye residuos

farmacéuticos, químicos y radiactivos [2], por el otro, la NOM-087 se enfoca en cinco categorías específicas, lo que genera discrepancias en los procesos de recolección, almacenamiento y disposición final.

En el ámbito operativo, la capacitación continua del personal es un factor determinante para el cumplimiento efectivo de los protocolos de bioseguridad. Se encontró que, en áreas críticas, la falta de capacitación actualizada lleva a usar mal el equipo de protección y a cometer errores al manejar residuos punzocortantes [14]. Esto aumenta los riesgos en el trabajo y pone en peligro la seguridad en el hospital.

La mejora del enfoque operativo en la gestión de RPBI no puede entenderse de forma aislada, sino como parte de un ecosistema de buenas prácticas que han demostrado ser efectivas en contextos internacionales. Por ejemplo, el modelo del NHS en el Reino Unido integra la trazabilidad digital, la segregación avanzada y auditorías internas como parte de su operación diaria, lo que ha permitido reducir riesgos y optimizar recursos.

En conjunto, estos estudios evidencian que el enfoque operativo en la gestión de RPBI requiere una articulación efectiva entre infraestructura, protocolos, supervisión y formación. La ausencia de cualquiera de estos elementos compromete la seguridad del proceso y aumenta el riesgo de exposición biológica, tanto para el personal como para el entorno hospitalario. Por ello, fortalecer los componentes operativos es una condición indispensable para avanzar hacia una gestión integral y competitiva de los residuos hospitalarios.

Buenas prácticas

En países como el Reino Unido, el sistema de salud pública ha dado pasos firmes hacia una gestión más sostenible. El documento técnico HTM 07-01 del NHS establece directrices claras para la trazabilidad digital, la segregación avanzada y la economía circular. Gracias a estas medidas, se ha logrado reducir significativamente el volumen de residuos y mejorar la rendición de cuentas institucional [8].

De forma complementaria, se ha insistido en la necesidad de integrar tecnologías limpias, minimizar residuos desde la fuente y garantizar la trazabilidad como parte de un sistema resiliente de salud [2]. No se trata sólo de cumplir con la norma, sino de construir una cultura de responsabilidad compartida.

En Colombia, una evaluación mensual de la gestión de residuos hospitalarios en una clínica de tercer nivel permitió identificar fallas operativas relacionadas con la capacitación, el seguimiento de compromisos y la supervisión de procesos tercerizados [8]. Se llegó a la conclusión que, sin un monitoreo constante, hasta los

sistemas más estructurados pueden presentar deficiencias críticas.

En resumen, las experiencias internacionales muestran que una gestión eficiente de RPBI no depende únicamente de tener un reglamento, sino de cómo se vive ese reglamento en el día a día. Con voluntad institucional, formación adecuada y herramientas tecnológicas accesibles, es posible transformar la gestión de residuos en una oportunidad para mejorar la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad del sistema hospitalario.

Desafíos comunes

A nivel global, uno de los principales desafíos en la gestión de residuos hospitalarios es la inadecuada segregación entre residuos comunes y peligrosos, lo que incrementa los riesgos para la salud del personal médico y la población, además de elevar los costos de tratamiento y generar impactos ambientales significativos [11].

Los hospitales que han adoptado sistemas de segregación con códigos de colores y ofrecen capacitación continua, han logrado reducir de manera significativa los riesgos y los costos relacionados con el manejo de residuos peligrosos.

Cuando la gestión de los RPBI no se realiza de manera adecuada, no solo pone en riesgo la salud del personal, sino que también afecta la efectividad de los controles y monitoreos. La falta de supervisión por parte de las instituciones, el desconocimiento sobre cómo usar el equipo de protección personal y el no llevar registros adecuados dificultan que los residuos peligrosos se trasladen de manera segura [15]. Esto aumenta las probabilidades de exposición y hace más difícil rastrear los residuos desde el momento en que se generan hasta que se disponen de forma correcta. Además, la rotación frecuente del personal, la falta de protocolos estandarizados y la débil cultura de bioseguridad siguen siendo barreras estructurales [6]; por ello, la fragilidad institucional en México obstaculiza el establecimiento de una política integral para la gestión de residuos hospitalarios.

Otro punto crítico es la tercerización de los servicios de recolección y tratamiento de RPBI, ya que puede parecer una solución eficiente, cuando no se acompaña de mecanismos de control y auditoría, puede generar más incertidumbre que beneficios.

Por otro lado, entre los principales riesgos del outsourcing están la pérdida de control sobre los procesos, la dependencia del proveedor y el incumplimiento de estándares de calidad [16].

En este escenario, la falta de una supervisión adecuada en la tercerización puede comprometer gravemente la gestión integral de los residuos hospitalarios. Por

ejemplo, la ausencia de auditorías regulares y de indicadores de rendimiento complica el seguimiento de los desechos y el cumplimiento de las normativas de bioseguridad.

En varios países de América Latina, las legislaciones todavía carecen de una estructura sólida y no siempre operan en coordinación entre los distintos niveles gubernamentales. Esto genera una discrepancia entre lo que establecen las normativas y lo que realmente ocurre en la práctica. Esta situación es especialmente evidente en hospitales privados, donde hay escasa supervisión externa y, en ocasiones, falta tanto voluntad política como recursos técnicos. Todo esto dificulta la implementación efectiva de programas para gestionar adecuadamente los residuos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño del estudio

Se realizó una revisión narrativa estructurada de la literatura científica y técnica sobre la gestión de RPBI en hospitales privados. El enfoque es cualitativo, descriptivo y no experimental, orientado a identificar y explicar las brechas entre la normativa vigente y su aplicación operativa, con base en tres dimensiones analíticas definidas a priori: normativa, operativa y organizacional.

Fuentes de información y ventana temporal

Se consultaron bases de datos académicas de amplio alcance (Scopus, Web of Science y PubMed), repositorios regionales (SciELO y RedALyC) y literatura técnica de organismos e instituciones del sector salud. La ventana temporal de búsqueda se estableció entre 2010 y 2025, con inclusión de documentos previos cuando su valor teórico o comparativo lo justificó. Se consideraron publicaciones en español e inglés con acceso a texto completo

Criterios de inclusión

- Pertinencia temática: estudios y documentos sobre clasificación, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición de RPBI en el ámbito hospitalario;
- Contexto institucional: énfasis en el sector privado de salud, incluyendo hospitales privados o entornos mixtos, con datos que se pueden separar para esta área;
- Rigor: artículos con revisión por pares, informes técnicos con respaldo institucional o normativo;
- Idioma: español o inglés; y,
- Acceso: disponibilidad de texto completo.

Criterios de exclusión

- Duplicados;
- Notas de prensa, entradas sin sustento técnico o documentos sin trazabilidad metodológica mínima; y,
- Estudios cuyo foco central no sea la gestión integral de RPBI en el entorno hospitalario.

Estrategia y procedimiento analítico

La búsqueda combinó descriptores en español e inglés relacionados con residuos sanitarios, residuos clínicos, infecciosos, trazabilidad, hospitales privados y normativa aplicable. La selección se realizó en dos etapas:

- Revisión por título y resumen para pertinencia y elegibilidad; y,
- Lectura a texto completo y extracción en matrices temáticas. La síntesis se organizó en cuatro ejes:
 - Normatividad: marcos legales, estándares y grado de implementación;
 - Operatividad: protocolos, logística interna, capacitación y supervisión;
 - Buenas prácticas: experiencias exitosas, innovaciones tecnológicas y modelos replicables; y,
 - Desafíos comunes: barreras estructurales, culturales y organizacionales que limitan la gestión efectiva.

Transparencia

Se documentó la ventana temporal, el conjunto de fuentes y los criterios empleados. Los conteos finales de registros identificados, cribados y retenidos, así como un diagrama de flujo del proceso de selección, se reportarán en el cuerpo del manuscrito cuando se cierre la última actualización de búsqueda.

Consideraciones éticas

Al tratarse de una revisión de literatura publicada, no se involucró trabajo con sujetos humanos ni datos sensibles, por lo que no se requirió evaluación por comité de ética.

Limitaciones del método

La naturaleza narrativa del diseño impide realizar inferencias cuantitativas generales; no obstante, permite una síntesis analítica amplia y útil para la toma de decisiones en el sector hospitalario privado.

RESULTADOS

Panorama general

La información obtenida, sugiere que en los hospitales privados, la aplicación de las normativas relacionadas con la gestión de RPBI es inconsistente y variable. A pesar de que los lineamientos técnicos establecen claramente los requisitos para la clasificación, el envasado, la recolección, el transporte y la disposición final, su implementación práctica se ve obstaculizada por la falta de estandarización en los protocolos, la capacitación irregular del personal y una supervisión institucional desigual. Esta situación impacta negativamente tanto en la trazabilidad como en la seguridad laboral.

Hallazgos por eje analítico

Normatividad

Se observan discrepancias entre lo que la regulación estipula y lo que realmente se lleva a cabo en el ámbito operativo del sector privado. La trazabilidad digital y los mecanismos de mejora continua son aspectos

tos que aún están en etapas iniciales. La existencia de marcos y directrices bien establecidos en otros sistemas de salud contrasta con la inconsistencia en el cumplimiento a nivel local.

Operatividad

Se observan cuellos de botella recurrentes: ausencia de protocolos estandarizados visibles en el punto de generación; rotación de personal y capacitaciones no sistemáticas; tercerización del servicio de recolección sin indicadores de desempeño ni auditorías internas regulares; y déficits en monitoreo del flujo de residuos. Estas condiciones incrementan el riesgo en el manejo de punzocortantes y comprometen la seguridad institucional.

Buenas prácticas

Surgen experiencias prometedoras en la integración de herramientas de trazabilidad (por ejemplo, etiquetado y registros digitales), en la segregación avanzada con auditorías periódicas, y en programas de formación continua. Modelos de economía circular muestran potencial para reducir el volumen de residuos desde la fuente y optimizar la disposición final. Si bien estas iniciativas no están generalizadas, constituyen referentes transferibles al contexto nacional.

Desafíos comunes

Predominan barreras organizacionales y culturales: débil cultura de bioseguridad, liderazgo insuficiente para sostener procesos de mejora, fragmentación entre responsabilidades internas y de proveedores, y dependencia de la tercerización sin mecanismos contractuales que aseguren calidad y cumplimiento. Estos factores dificultan la estandarización para evitar la brecha entre la aplicación de la norma y su práctica.

Síntesis interpretativa.

Consideradas en conjunto, las evidencias sugieren que el desalineamiento entre la norma y la operación no se explica solo por la disponibilidad de infraestructura o insumos, sino por la articulación incompleta entre dimensión normativa (claridad y vigilancia), dimensión operativa (protocolos, formación, trazabilidad) y dimensión organizacional (gobernanza, cultura de bioseguridad, contratos con indicadores). Entender esta interdependencia es clave para orientar acciones de mejora factibles y sostenibles en los hospitales privados.

En el ANEXO A se presenta la comparación de los ejes analíticos en la gestión de RPBI en hospitales privados.

Líneas de acción

Con base en el análisis bibliográfico realizado, se proponen las siguientes líneas de acción estratégi-

cas para fortalecer la gestión de los RPBI en hospitales privados. Estas propuestas buscan cerrar las brechas identificadas entre la normativa vigente y su aplicación práctica, promoviendo un enfoque integral, sostenible y alineado con estándares internacionales:

1. Fortalecer los mecanismos de supervisión institucional y fiscalización externa, mediante auditorías internas periódicas, sistemas de trazabilidad digital y esquemas de control que garanticen el cumplimiento normativo.
2. Establecer protocolos operativos estandarizados y visibles en cada punto de generación de residuos, asegurando su aplicación uniforme en todas las áreas hospitalarias.
3. Implementar programas de formación continua en bioseguridad y gestión de residuos, dirigidos a todo el personal hospitalario, con énfasis en la correcta clasificación, recolección y disposición de los RPBI.
4. Promover la adopción de tecnologías limpias y modelos de economía circular, que permitan reducir el volumen de residuos desde la fuente y optimizar su tratamiento final.
5. Fomentar la articulación normativa entre niveles de gobierno y sectores institucionales, para lograr una fiscalización efectiva, homogénea y coordinada.
6. Incentivar la investigación aplicada sobre modelos replicables de gestión de residuos hospitalarios, que generen evidencia útil para la toma de decisiones y la mejora continua.
7. Diseñar políticas públicas integrales que incorporen sostenibilidad, bioseguridad y eficiencia operativa como ejes estratégicos, promoviendo una cultura de responsabilidad compartida.

Contribución del estudio

Este estudio ofrece un marco analítico integrador que articula tres dimensiones –normativa, operativa y organizacional– y las operacionaliza en cuatro ejes de lectura (normatividad, operatividad, buenas prácticas y desafíos). Dicho marco permitió explicar la brecha norma-práctica observada en hospitales privados: por un lado, la existencia de lineamientos claros pero aplicación parcial y heterogénea; por otro, la persistencia de cuellos de botella en protocolos, capacitación, supervisión y gobernanza. Al organizar la evidencia bajo estos ejes, se aportó trazabilidad conceptual entre los hallazgos y las causas subyacentes, mostrando cómo las limitaciones técnicas se sostienen –y a veces se amplifican– por arreglos institucionales y decisiones de gestión que el análisis tradicional tiende a invisibilizar.

A partir de este marco, se organiza una tipología básica de brechas y sus mecanismos de mejora:

- En el ámbito normativo, la falta de trazabilidad digital y la verificación interna regular dificultan el cumplimiento sostenido;
- En el ámbito operativo, la ausencia de estandarización y visibilidad de los protocolos desde el punto de generación, la capacitación irregular y la subcontratación sin indicadores afectan negativamente la eficiencia y seguridad;
- En el ámbito organizacional, el liderazgo, la supervisión y la cultura de bioseguridad son factores clave para una verdadera adherencia a las normas.

En respuesta a estas cuestiones, el estudio sugiere acciones que pueden implementarse rápidamente: estandarizar y hacer visibles los protocolos, establecer una trazabilidad digital mínima en lo que se refiere a etiquetado/registro origen-acopio-salida, formalizar auditorías internas periódicas.

Como una contribución práctica, se propone un conjunto básico de indicadores que transforman la revisión en una herramienta de gestión efectiva. En el ámbito de la segregación, se sugiere medir el cumplimiento por punto de generación y las no conformidades por servicio; en cuanto a trazabilidad, registrar el porcentaje de bultos con cadena completa y los tiempos dedicados a recolección y traslado; respecto a capacitación, monitorear la cobertura trimestral y la adherencia observacional; y en lo que respecta a tercerización, seguir las ventanas de servicio, los incidentes y las no conformidades por cada 1 000 kg. Estos indicadores son escalables y económicos, lo que refuerza la rendición de cuentas y vincula la norma con su aplicación práctica, proporcionando a los hospitales privados una guía clara para mejorar la seguridad, aumentar la eficiencia y fortalecer el cumplimiento normativo en la gestión de RPBI.

CONCLUSIONES

La gestión de los RPBI en hospitales privados se mantiene como un ámbito crítico con márgenes significativos de mejora. La revisión narrativa estructurada confirma que, aunque la normativa mexicana define lineamientos técnicos claros, su aplicación en la práctica es parcial y heterogénea, frecuentemente limitada por factores estructurales.

Entre los descubrimientos más significativos se encuentran la falta de protocolos operativos estandarizados y visibles en el lugar de generación, la capacitación irregular del personal, la externalización sin mecanismos de control fundamentados en indicadores y una supervisión institucional deficiente. Estas condiciones impactan negativamente la trazabilidad de los residuos, elevan el riesgo para la salud laboral y complican el cumplimiento continuo de las normati-

vas. No obstante, se han reconocido experiencias exitosas que evidencian la posibilidad de avanzar hacia una gestión más eficaz y segura. Además, la utilización de herramientas digitales para la trazabilidad, la implementación de estrategias de economía circular y la formalización de programas de capacitación continua han mostrado resultados favorables en diferentes contextos. Sin embargo, su aplicación todavía no es ni generalizada ni sistemática.

Los hallazgos de este estudio presentan una aplicación directa para la toma de decisiones en hospitales privados, ya que facilitan la identificación precisa de los eslabones en la cadena operativa donde se produce la discrepancia entre la normativa y su implementación práctica.

La síntesis generada guía a las instituciones hacia acciones específicas y viables: estandarizar protocolos visibles en el punto de origen, introducir mecanismos básicos de trazabilidad digital, llevar a cabo auditorías internas periódicas y reforzar la capacitación continua con evaluaciones de adherencia. Estas recomendaciones brindan a los establecimientos privados criterios operativos, organizativos y de gobernanza que podrían potenciar la seguridad, mejorar la eficiencia y garantizar el cumplimiento regulatorio en la gestión de RPBI.

Más allá de los componentes técnicos, las limitaciones centrales se vinculan con elementos organizacionales y de gobernanza. La falta de liderazgo institucional, la fragmentación normativa-operativa y una cultura de bioseguridad incipiente restringen la consolidación de un sistema integral y sostenible.

En consecuencia, mejorar la gestión de los RPBI en hospitales privados exige una estrategia coordinada que combine:

1. Supervisión efectiva con auditorías internas y contratos de tercerización sujetos a indicadores de desempeño;
2. Estandarización y visibilidad de protocolos a lo largo de toda la cadena de manejo;
3. Fortalecimiento de capacidades mediante formación continua y evaluación de adherencia; y,
4. Una cultura organizacional orientada a la seguridad, la sostenibilidad y la responsabilidad compartida

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Secretaría de Salud (México), "NOM 087 ECOL SSA1 2002: Protección ambiental-Salud ambiental-Residuos peligrosos biológico infecciosos-Clasificación y especificaciones de manejo," Diario Oficial de la Federación, 2002. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/680173/NOM-087-ECOL-SSA1-2002.pdf> [Accedido: 3 oct 2025].*

- [2] Organización Mundial de la Salud (OMS) y UNICEF, "WASH in health care facilities: Global progress report," 2023. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/978924007012> [Accedido: 3 nov 2025].
- [3] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "Manual de seguridad y salud para empresas pequeñas (OSHA 4261 01R)," U.S. Department of Labor, 2024. Disponible en: <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA4261.pdf> . [Accedido: 15 oct 2025].
- [4] A. J. A. Ibáñez-Cruz, A. M. E. Vergara-Florián, and W. C. Algoner, "Hospital solid waste management strategies to prevent healthcare-associated infections from occupational exposure to bloodborne pathogens and improve occupational safety," *Frontiers in Public Health*, vol. 13, 2025. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1499463>
- [5] T. S. da Silva, G. J. A. Aguiar, S. M. Santos, and L. Florencio, "A review on recent developments in sustainable healthcare waste management," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 32, pp. 19672–19690, 2025 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-025-36844-z> [Accedido: 5 nov 2025].
- [6] R. Muñoz Hernández, "Comparación de la gestión de residuos hospitalarios en México, Suiza y Francia," *Revista Internacional de Salud Ambiental*, vol. 16, no. 2, pp. 101–115, 2010.
- [7] W. A. Tirado Zavaleta, "Brecha de recursos humanos y la calidad de atención en servicios sanitarios," *Revista Médica Científica Multidisciplinaria*, vol. 9, no. 3, 2023. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/373892042> [Accedido: 15 oct 2025]
- [8] NHS England, "NHS clinical waste strategy," 2023. Disponible en: <https://www.england.nhs.uk/estates/nhs-clinical-waste-strategy/> [Accedido: 12 oct 2025].
- [9] R. Ticona Casani y M. Sutta Huamán, "Evaluación del cumplimiento de la normativa de residuos hospitalarios en clínicas privadas," *Revista Peruana de Salud Pública*, vol. 38, no. 2, pp. 67–74, 2021.
- [10] L. C. Riofrío Cortés y J. Torres Agredo, "Herramienta para evaluar la gestión de residuos hospitalarios," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 26, no. 1, pp. 41–56, 2016, doi: <https://doi.org/10.18359/rcin.1671> [Accedido: 15 oct 2025].
- [11] E. Janik Karpinska et al., "Healthcare waste—A serious problem for global health," *Healthcare*, vol. 11, no. 2, p. 242, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/healthcare11020242> [Accedido: 25 oct 2025].
- [12] M. L. Ávalos Rodríguez, J. V. Alcaraz Vera, y J. J. Alvarado Flores, "Manejo de residuos peligrosos en la región Cuitzeo, Michoacán, a partir de la aplicación del método de valoración contingente," *Economía: teoría y práctica*, no. 48, pp. 151–172, 2018, doi: <https://doi.org/10.24275/etypuam/ne/482018/avalos> [Accedido: 2 oct 2025].
- [13] B. Nares Lara, R. Chávez Rivera, y J. M. Brotons Martínez, "Análisis bibliométrico sobre residuos peligrosos biológico infecciosos y residuos médicos (2000–2021)," *CIMEXUS*, vol. 18, no. 2, pp. 105–132, 2024. Disponible en: <https://cimexus.umich.mx/index.php/cimexus/article/view/506> . [Accedido: 4 oct 2025].
- [14] J. X. Zúñiga Pacheco, "Cumplimiento de las normas de bioseguridad en la UCI del Hospital Luis Vernaza," *Revista Eugenio Espejo*, vol. 13, no. 2, pp. 28–41, 2019. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5728/572861392006/html/> [Accedido: 4 oct 2025].
- [15] M. A. Arciniega Galaviz, "Diagnóstico del manejo de residuos peligrosos biológico infeccioso generados en hospital nivel II en México," *Revista Minerva*, vol. 6, no. 3, pp. 55–66, 2023, doi: <https://doi.org/10.5377/revminerva.v6i3.17354> [Accedido: 15 nov 2025].
- [16] J. Bedoya-Gómez, "Riesgos del outsourcing en la gestión de residuos hospitalarios," *Gestión y Salud*, vol. 6, no. 2, pp. 34–41, 2018.
- [17] Ó. A. Galindo Rodríguez, "Transformación digital: una agenda de oportunidades para la investigación y la práctica," *Revista Perspectiva Empresarial*, vol. 7, no. 2, pp. 3–6, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/6722/672271537001.pdf>. [Accedido: 5 nov 2025].

Anexo A. Comparación de los ejes analíticos en la gestión de RPBI en hospitales privados.

Eje analítico	Definición	Hallazgos clave	Aplicación práctica en hospitales privados
Normatividad	Análisis de marcos legales, normas técnicas y su grado de implementación.	La normativa mexicana establece lineamientos claros, pero su aplicación es parcial y heterogénea. Existen brechas entre lo estipulado y lo implementado.	Algunos hospitales privados aplican la NOM-087 parcialmente, sin auditorías internas ni trazabilidad digital.
Operatividad	Revisión de procesos logísticos internos, protocolos, supervisión y capacitación.	Falta de protocolos estandarizados, escasa capacitación y tercerización sin control afectan la eficiencia del sistema.	En hospitales privados, la recolección y clasificación de RPBI suele depender del proveedor externo, sin indicadores de desempeño ni supervisión continua.
Buenas prácticas	Identificación de experiencias exitosas, innovaciones tecnológicas y modelos replicables.	Se han documentado experiencias exitosas con trazabilidad digital, economía circular y formación continua.	Algunos hospitales han comenzado a implementar códigos QR para seguimiento de residuos y programas de capacitación en bioseguridad.
Desafíos comunes	Detección de barreras estructurales, culturales y organizacionales que limitan la gestión efectiva de RPBI.	Persisten problemas como la rotación de personal, débil cultura de bioseguridad y falta de seguimiento institucional.	En hospitales privados, la gestión de RPBI se ve afectada por la falta de liderazgo institucional y la ausencia de políticas integrales.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Desarrollo y validación de un dispositivo para determinar la infiltración de agua en suelos de agostaderos



Colaboración

Ángel David Záizar González; Darío Cisneros Arreola; Merit Cisneros González; Manuel Ismael Mata Escobedo, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana

Fecha de recepción: 03 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación: 13 de febrero de 2026

Autor de Correspondencia: Ángel David Záizar González

RESUMEN: La infiltración del suelo es uno de los factores más importantes en el desarrollo y en la sustentabilidad de pastizales, para su estudio existen dispositivos como los infiltrómetros, sin embargo con el pasar de los años no se han actualizado con las nuevas tecnologías siendo dispositivos bastante demandantes en cuanto a su utilización y manejo. El presente trabajo consiste en el desarrollo y validación de un infiltrómetro, con el objetivo de proporcionar una herramienta económica, eficiente y adaptable a cualquier tipo de suelo de agostadero mediante la implementación de un sistema electrónico que permite su automatización con un microcontrolador. El dispositivo fue validado en suelos de agostaderos de la Hacienda San Lorenzo en 3 sitios donde se obtuvieron parámetros de velocidad de infiltración ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$) e infiltración acumulada (L). Los resultados demostraron la autonomía y practicidad del infiltrómetro, así como su adaptabilidad a suelos pedregosos.

PALABRAS CLAVE: Agricultura, Electrónica, Infiltrómetro, Internet de las Cosas, Sensor Ultrasónico.

ABSTRACT: Infiltration is one of the main factors in the development and sustainability of grasslands, devices such as infiltrometers are available for its study. However, infiltrometers have not been updated with new technologies in the past years, although being quite demanding in its use and handling. The present work consists in the development and validation of an infiltrometer. The objective is to provide an economic, efficient and adaptable tool to any type of rangeland through the implementation of an electronic system that allows its automation with a microcontroller. The device was validated in three sites within the rangelands of Hacienda San Lorenzo. It obtained the parameters of infiltration rate ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$) and cumulative infiltration (L). The results showed the autonomy and practicality of the infiltrometer, as well as its adaptability to stony soils.

KEYWORDS: Agriculture, Electronic, Infiltrometer, Internet of Things, Ultrasonic Sensor.

INTRODUCCIÓN

Los pastizales son la fuente principal de alimento del ganado bovino y en el mundo hay alrededor de 1,887,712,280 ha de acuerdo con FAO [1]. Asimismo, en México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportó en el 2014 que alrededor del 40 % de los pastizales se encuentran en condiciones deplorables, principalmente esto se debe a la mala administración del ganado y el nulo conocimiento sobre el estado del suelo [2]. De los principales factores altamen-

te relacionados a la calidad de suelos de agostaderos son la infiltración y la retención del agua, que permiten conocer el verdadero aprovechamiento del agua de lluvia, y a la vez, saber si hay pérdidas por escurrimiento y evaporación que influyen significativamente en el desarrollo de biomasa y en la calidad del suelo.

El desarrollo de nuevas tecnologías como el internet de las cosas (IoT) permite el monitoreo y la recopilación de datos mejorando la interacción entre dispositivos y procesos con el usuario, por consecuencia, ha tenido repercusión en distintas áreas de la industria así como en el campo. La agricultura de precisión (AP) consiste en la implementación de sistemas de geolocalización y monitoreo del campo, con la automatización y optimización de diversos procesos y tareas, como tractores con sistemas de conducción automática, drones fertilizadores o sistemas de detección de plagas, permitiendo al sector industrial cubrir la alta demanda de alimento de origen vegetal [3-6].

Para el estudio de la infiltración del suelo existen técnicas y dispositivos para determinar su comportamiento y uno de los más comunes son los infiltrómetros, que simulan el comportamiento del agua de lluvia mediante el registro del nivel del agua en distintos intervalos de tiempo. Sin embargo los infiltrómetros comerciales además de carecer de nuevas tecnologías que permitan la optimización del estudio, son inaccesibles para el ganadero local por sus altos costos.

Investigadores como Abdelmoneim et al. [7]; Latorre et al. [8] y Blanco-Gomez et al. [9] desarrollaron infiltrómetros de doble anillo (infiltrómetro de Müntz), disco de tensión y anillo único respectivamente, con un sistema de IoT con el objetivo de recopilar y manejar la información de manera eficiente. Utilizaron sensores de presencia, cámaras y sensores ultrasónicos para medir el nivel del agua. Los prototipos demostraron buena viabilidad y mejor eficiencia respecto a los procesos de medición utilizados en métodos convencionales.

Este dispositivo a diferencia de los prototipos mencionados, presenta adecuaciones tanto en estructura como en electrónica que permiten mejorar su eficiencia, portabilidad y capacidad de operar en suelos de agostaderos duros y de alta pedregosidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

Metodología

Para el desarrollo y validación de este prototipo se consideraron las siguientes etapas: elaboración del infiltrómetro, área de estudio y pruebas de campo.

Elaboración del infiltrómetro

Estructura

La estructura del infiltrómetro está conformada por 2 anillos concéntricos; el anillo central (pluviómetro) permite medir el grado de infiltración del agua en

suelo y está constituido por un tubo de PVC hidráulico de 16 cm de diámetro y 45 cm de altura; el anillo exterior (cilindro de inundación) satura el suelo que rodea al anillo central que está constituido por una cubeta de pintura con base mayor de 30 cm de diámetro, base menor de 27 cm de diámetro y un altura de 36 cm, permitiendo que el agua baje de forma recta y evitando desviaciones de la misma en distintas capas del suelo, por lo tanto el comportamiento del agua capturado por el pluviómetro tiene un mayor grado de confiabilidad (Figura 1).

Asimismo, la implementación de estacas y bases de acero en ambos anillos permite una mejor penetrabilidad en todo tipo de suelo. Las estacas son varillas de $\frac{1}{2}$ " con una longitud de 20 cm con una base triangular para tener un área de impacto mayor al momento de la instalación en el agostadero. Estas fueron soldadas a una base metálica elaborada con solera de $\frac{1}{4}$ " que cuenta con un anillo de alambro de 5 cm de grosor el cual da soporte a la parte plástica de los anillos (Figura 2 y 3).

Sistema de adquisición de datos (DAQ)

Para el DAQ se utilizó el ESP-32 DevKit v1, un micro controlador (uC) de fácil manejo y bajo costo. Está conformado por una memoria Flash de 4 MB, SRAM de 500 KB, procesador de 32 bits, más de 20 pines de entrada/salida (I/O) y cuenta con conectividad inalámbrica por medio de Bluetooth y Wifi. Gracias a ello, el prototipo cuenta con la capacidad de realizar múltiples funciones y mantener comunicación a distancia con el usuario.

Composición del DAQ

El DAQ está conformado por distintos componentes y dispositivos electrónicos de bajo costo, asimismo cuenta con el uso de un uC y de una memoria microSD, los cuales permiten el almacenamiento de información en una unidad de memoria física y, al mismo tiempo, el monitoreo del comportamiento del nivel de agua vía internet.

Para la alimentación de todo el circuito fue necesario el uso de una fuente de voltaje, se utilizaron 4 pilas Li-Ion 18650 que proporcionan un voltaje nominal de 3.7 V y un amperaje de 2200 mAh, se colocaron en un arreglo en serie para alcanzar un voltaje mayor de 14 V, con el objetivo de mantener el dispositivo en funcionamiento por más de 10 h debido a que la técnica propuesta por Klute (1986) [10] que especifica la necesidad de mantener la prueba constante en un lapso aproximado a 5 h siendo esto una limitante para la implementación de dispositivos electrónicos cuando es necesario realizar más de una prueba. Para el abastecimiento de agua fue necesario el uso de una bomba de agua que funciona con 12 V y 800 mAh, por lo tanto se implementó un módulo Step-Down MP1584 para ajustar la alimentación a 12 V fijos. Asimismo, regular 5 V para la alimentación del uC y los demás componentes conectados a este.



Figura 1. Estructura infiltrómetro.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Fabricación de base metálica.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Unión base metálica con parte plástica.
Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el nivel de agua en el pluviómetro fue necesario conocer la velocidad a la que el suelo absorbe el agua, para ello es importante el uso del sensor Grove Ultrasonic Ranger v2.0, el cual es un sensor ultrasónico de bajo costo con una alimentación de 3.3 V, buena precisión y un alcance de 3.5 m, que permite conocer la distancia a la que se encuentra el nivel del agua respecto a un punto fijo, por lo tanto al conocer los intervalos de tiempo es posible determinar la velocidad a la que el suelo absorbe el agua, como se demuestra en la siguiente ecuación:

$$v_{i,j} = \frac{(d_i - d_j)}{t_{i,j}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde $v_{i,j}$ es la velocidad entre el intervalo i y j (cm/s); d es la distancia obtenida por el sensor (cm); $t_{i,j}$ es el tiempo transcurrido entre las lecturas de los intervalos i y j (s).

Instalación del DAQ

La adaptación del DAQ al infiltrómetro se llevó a cabo mediante el desarrollo de fixturas que fueron realizadas mediante FreeCAD que es un software de dibujo asistido por computadora, posteriormente fueron materializadas por medio de la impresión 3D, por ello se trabajó con la impresora Ender 3 V2 de la marca Creality. Como material de impresión se utilizó filamento PLA de 0.75 mm de diámetro de la marca Steren (Figura 4).

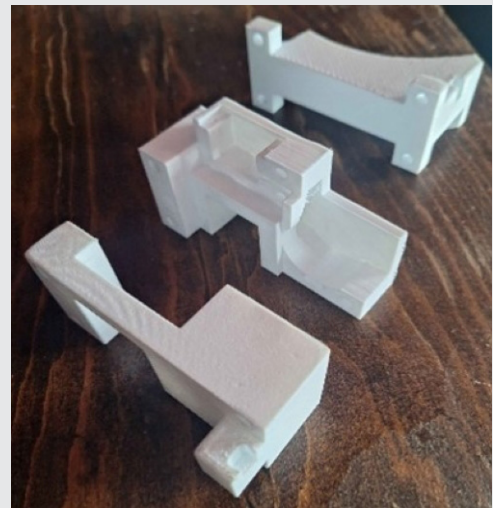


Figura 4. Fixturas impresas en 3D.
Fuente: Elaboración propia.

El sistema al iniciar evalúa si el DAQ cuenta con una tarjeta microSD, con el fin de asegurar los datos que se recopilaran durante el estudio, de no contar con ella el sistema automáticamente se reinicia hasta que el usuario inserte una memoria microSD funcional. Asimismo, cuenta con una interfaz manejable mediante menús, donde es posible seleccionar si se desea iniciar el proceso de calibración o el estudio, este se puede realizar con o sin conexión a internet y de igual

forma seleccionar si se desea utilizar el sistema de bombeo (Figura 5).

Al iniciar el estudio el DAQ captura el nivel inicial de agua del pluviómetro y posteriormente espera un tiempo predefinido. Una vez suspendido o terminado el estudio, los datos de las lecturas y el cálculo de las variables velocidad de infiltración e infiltración acumulada son almacenados en la memoria microSD en un archivo tipo CSV.

La autonomía del infiltrómetro, conectividad y viabilidad de las lecturas son indispensables para que cualquier persona pueda realizar un estudio correcto del suelo, para ello se diseñó un sistema de auto-calibración y un sistema de monitoreo.

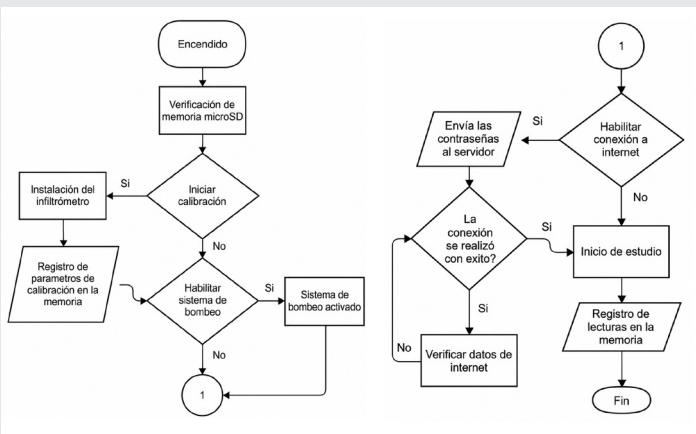


Figura 5. Diagrama de flujo sobre el funcionamiento del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Sistema de auto-calibración

El sistema de calibración consiste principalmente en la implementación de un motor a pasos 28BYJ-48 que genera el desplazamiento lineal de una referencia por medio de un mecanismo cremallera-piñón, permitiendo al DAQ mantenerse calibrado en todo momento. Para el algoritmo de calibración la referencia se desplaza en intervalos de 5 cm iniciando desde los 5 a los 35 cm respecto al sensor (Figura 6).

Para ajustar los datos obtenidos por el sensor a las distancias reales, se utilizó el método de mínimos cuadrados con las ecuaciones que se presentan a continuación [11]:

$$m = \frac{\sum XY - \frac{(\sum X)(\sum Y)}{n}}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$b = \bar{Y} - m\bar{X} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde m es la pendiente de la función; b es la ordenada de la función; Y son los valores reales (cm); X son las lecturas sin ajuste (cm); n es la cantidad de lecturas registradas.

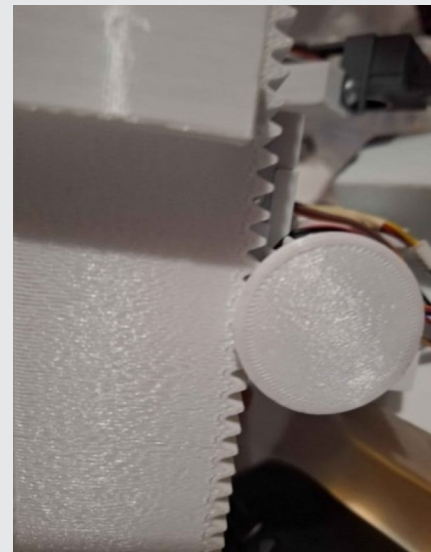


Figura 6. Mecanismo de auto-calibración.

Fuente: Elaboración propia.

Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo se realizó para conocer en tiempo real el comportamiento del nivel del agua, mediante el uso de internet por medio de la plataforma ThingSpeak que es una plataforma en línea para la proyección de información recopilada entre dispositivos con aplicaciones de IoT y/o por un display LCD 4x20 con interfaz I2C (Figura 7). Con ello se puede comprobar si el funcionamiento del sensor es correcto durante el proceso de calibración o durante el estudio.

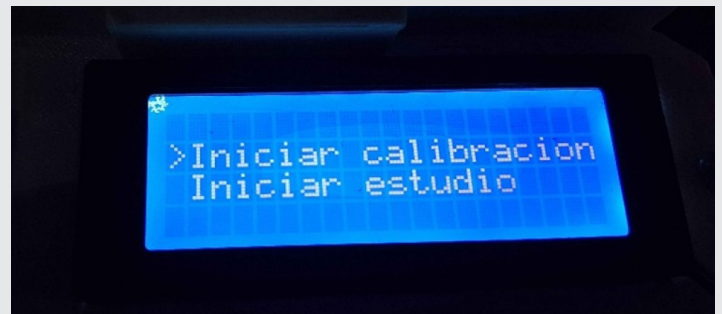


Figura 7. Display LCD 4x20.

Fuente: Elaboración propia.

Área de estudio

La prueba se desarrolló en suelos de agostadero de la Laguna San Lorenzo, ubicada cerca de la Hacienda San Lorenzo por la carretera de Durango al Mezquital Km 13 del estado de Durango, México. Con temperatura promedio anual de 18 °C y una precipitación promedio de 500 mm.

Pruebas de campo

Se instalaron infiltrómetros en 3 sitios próximos unos del otro (A, B y C), a los cuales se les retiró la cobertura vegetal. Posteriormente, los infiltrómetros fueron enterrados a 15 cm de la superficie del suelo (Figura 8).

El infiltrómetro del sitio C a diferencia de los otros 2, se le habilitó el sistema de bombeo que permitió el llenado constante del infiltrómetro entre los tiempos de lectura evitando así la necesidad de realizar un abastecimiento manual de agua (Figura 9). Los 3 infiltrómetros fueron observados con regularidad para asegurar su correcto funcionamiento durante las 3 h y 18 minutos que duró el estudio, donde se obtuvieron 13 lecturas.



Figura 8. Instalación de infiltrómetros.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 9. Infiltrómetro del sitio C con sistema de bombeo.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento similar entre los sitios B y C en la velocidad de la infiltración como se muestra en la Figura 10 donde se aprecia como el agua se infiltra rápidamente en el suelo hasta llegar a un punto de saturación en el intervalo de los 10 y 20 minutos, asimismo se observó una velocidad máxima (72.47; 60, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$) y mínima bastante similar (5.92; 6.48, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$). El sitio A alcanza esa saturación por primera vez en el minuto 4, y posteriormente logra sobrepasar una capa del suelo para nuevamente llegar a un punto de saturación entre los 30 y 35 minutos. Esto se debe principalmente a que este sitio fue el que presentó un mayor grado de humedad el cual era notable desde la primera capa del suelo como se aprecia en la Figura 11, debido a las lluvias que se presentaron con regularidad durante el mes de Agosto.

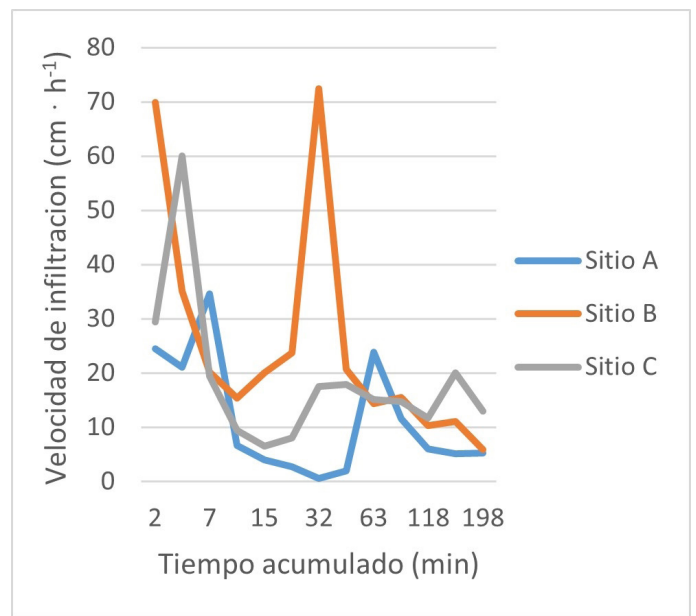


Figura 10. Velocidad de infiltración de los 3 sitios.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 11. Humedad del suelo en el sitio A.
Fuente: Elaboración propia.

A consecuencia de la humedad del sitio A la infiltración acumulada también se vio afectada, donde el nivel del agua solamente se desplazó 26.68 cm (4.69 L) en total, a diferencia de los sitios B y C que contaron con una infiltración acumulada de 53.1 y 50.61 cm (9.34; 8.90, L) respectivamente como se muestra en la Figura 12.

El impacto del sensor Grove en el DAQ fue bastante positivo, debido a que mide la distancia a la que se encuentra el nivel del agua en un amplio rango y a tiempos preestablecidos, a diferencia del prototipo presentado por Abdelmoneim et al., (2021) que determina la velocidad de infiltración con sensores de presencia y por consecuencia el tiempo se ve sujeto a la respuesta de varios sensores que se pueden ver afectados por circunstancias ambientales como la materia orgánica que se puede encontrar en el suelo.

Asimismo el uso del sensor Grove es una alternativa mucho más económica en comparación al uso de la cámara de un Smartphone propuesta por Latorre et al., (2021). Sin embargo, al obtener mediciones analógicas se recomienda una verificación doble del nivel del agua al momento de utilizar un sistema de bombeo, esto debido a que al momento de abastecer el anillo central de agua existe la posibilidad de detectar erróneamente el nivel inicial.

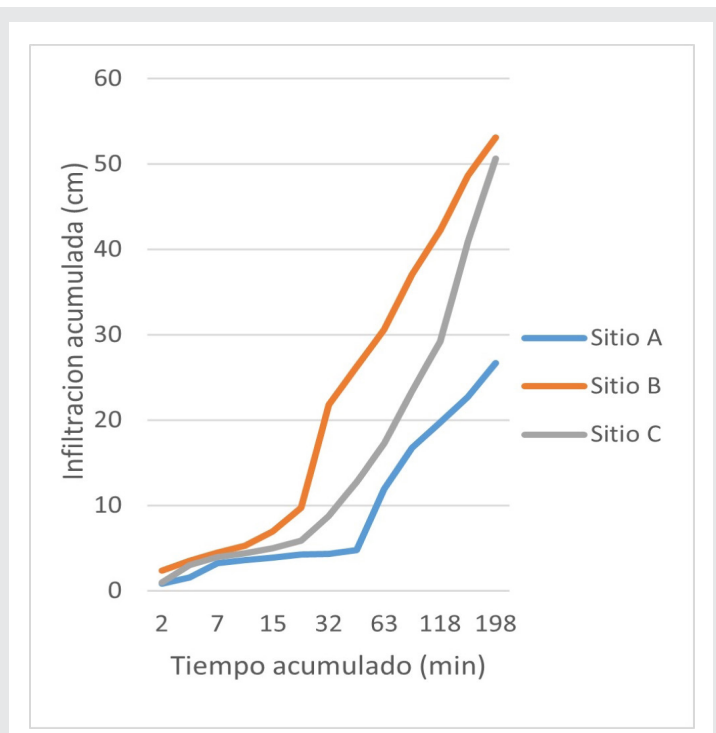


Fig. 12 Infiltración acumulada de los 3 sitios.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La implementación de las bases metálicas permitió una mejor y más fácil penetración del suelo, asimismo la adaptación del DAQ al infiltrómetro de anillos concéntricos simplificó significativamente la toma de lec-

turas y el análisis de datos que se realiza generalmente en lluvias simuladas con infiltrómetros genéricos. Se recomienda cubrir con tierra la periferia del anillo de inundación para evitar posibles fugas en el anillo exterior, como las que se presentaron en la primera carga de los sitios A y B y por consecuencia el DAQ inició el registro de datos más tarde de lo esperado. Asimismo, en la aplicación del IoT se recomienda contar con un extensor de señal o estar ubicado en un área con buena recepción debido a que en el presente trabajo por la ubicación de los sitios estudiados no fue posible entablar conexión con el servidor de ThingSpeak.

BIBLIGRAFÍA

[1] Fao. (2022). FAOSTAT. Obtenido el 21 de agosto de 2024, de la página electrónica: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/LC/visualize>

[2] Biodiversidad. (2022). Pastizales. Obtenido el 21 de agosto de 2024, de la página electrónica: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/pastizales>

[3] Tantan, J., Xiongze, H. (2024). *Robotic arms in precision agriculture: A comprehensive review of the technologies, applications, challenges, and future prospects*. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 221.

[4] Gurumita, G., Ramesh, G. P. (2022). *Mango leaf disease detection using ultrasonic sensor*. En *IEEE International Conference on Data Science and Information*

System (ICDSIS) (pp. 1-5). Hassan, India.

[5] Ruiz, M. E., Garcia, R., Machado, N. (2024). *Application of drones in international and Cuban agricultura*. *Revista Ciencias Tecnicas Agropecuarias*, vol. 33, no. 1, Mayabeque, Cuba.

[6] Perez-Acosta, O. G., Mejias, A. (2024). *Computer system for the energy potential determination in pig's Enterprise*. *Cuban Journal of Agricultural Science*, vol. 58, Mayabeque, Cuba.

[7] Abdelmoneim, A. A., Daccache, A., Khadra, R., Bhanot, M., Dragonetti, G. (2021). *Internet of Things (IoT) for double ring infiltrometer automation*. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 188.

[8] Latorre, B., Moret-Fernández, D., Lyons, M. N., Palacio, S. (2021). *Smartphone-based tension disc infiltrometer for soil hydraulic characterisation*. *Journal of hydrology*, vol. 600.

[9] Blanco-Gómez, P., Mateu-Belloch, A., Jiménez-García, J. L., Salas-Cantarellas, A. J., Pieras-Company, J. J., Santamaria-Casals, E.

(2024). *Real-time ultrasonic water level IoT sensor for in-situ soil permeability testing*. *HardwareX*, vol. 19.

[10] Klute, A. (1986). *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*. En *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America* (2), Madison, USA.

[11] Varsity Tutors. (2024). *Recta que mejor se ajusta (método de mínimos cuadrados)*. Obtenido el 21 de agosto de 2024, de la página electrónica: https://www.varsitytutors.com/hotmath/hotmath_help/spanish/topics/line-of-best-fit. *Science and Technology* 22, 1098-1104.





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Evaluación de la Temperatura de Calentamiento en la Tecnología de Reciclaje de Polietileno Mediante Degradación



Colaboración

Irma Pérez Hernández; José Echegaray Franyutti; Rosa M. Vaca Espino; Angelica Pérez Hernández, Universidad Veracruzana; José Nolasco Cruz, Universidad de Guanajuato

Fecha de recepción: 03 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2026

Autor de Correspondencia: José Nolasco Cruz

RESUMEN: El presente trabajo se presenta un caso de estudio experimental sobre la degradación termoquímica del polietileno de alta densidad (HDPE), evaluando la influencia de la temperatura y velocidad de calentamiento. El estudio fue realizado en un reactor tipo semi-batch de acero a 3 diferentes temperaturas (380, 420, 460 °C) y 3 diferentes velocidades de calentamiento (15, 17, 23 °C.min⁻¹). Para el estudio se utilizaron 250g de HDPE en forma de pellets. Los resultados muestran que a una temperatura de 460 °C se logran obtener tasas de conversión superiores al 95 % en peso, y a temperaturas por debajo de los 400 °C la tasa de conversión termoquímica tiende a disminuir considerablemente, aumentando los compuestos recalcitrantes.

PALABRAS CLEVE: Líquido combustible, HDPE, Degradación, Reciclaje alternativo.

ABSTRACT: This study presents an experimental case study on the thermochemical degradation of high-density polyethylene (HDPE), evaluating the influence of temperature and heating rate on the process performance. The experiments were conducted in a stainless-steel semi-batch reactor at three different temperatures (380, 420, and 460 °C) and three heating rates (15, 17, and 23 °C.min⁻¹). A total of 250 g of pelletized HDPE was used in each experimental run. The results demonstrated that, at 460 °C, conversion yields above 95 wt. % were achieved. In contrast, at temperatures below 400 °C, the thermochemical conversion rate decreased significantly, promoting the formation of recalcitrant compounds.

Keywords: liquid fuel, HDPE, thermochemical degradation, alternative recycling.

INTRODUCCIÓN

Desde mediados del año 1900, la demanda de plástico ha crecido año tras año, hasta ser casi irremplazables para el ser humano en la sociedad moderna. La producción mundial de plástico para el año 2017 fue cercana a 350 millones de toneladas, y se espera que siga creciendo cada año (Park et al., 2020). Debido a ello, ha incrementado la acumulación de residuos plásticos, generando a su vez problemas por alta disposición de residuos en los vertederos. De acuerdo con algunas estadísticas tan solo en Europa cerca del 39 % de

todo el plástico consumido termina en vertedero (Al-Salem et al., 2017).

Generalmente los plásticos se dividen en dos grandes familias, termoplásticos y termoestables. Dentro del grupo de termoplásticos se pueden encontrar el polietileno de baja densidad (por sus siglas en inglés, LDPE), polietileno de alta densidad (por sus siglas en inglés, HDPE), poliestireno (por sus siglas en inglés, PS), policloruro de vinil (por sus siglas en inglés, PVC), polietileno tereftalato (PET), policarbonato (por sus siglas en inglés, PC) y Poli-metacrilato de metilo (por sus siglas en inglés, PMM). Los termoestables son el poliuretano, poliéster, éster de vinilo, silicón y resina de melamina (Aisien et al., 2021; Kyaw et al., 2015).

De acuerdo con la Asociación Europea de Plásticos (Plastics Europe) el HDPE ocupa el tercer lugar como plástico de mayor consumo, representado por un 12,2 % (Plastics Europe, 2019). El HDPE generalmente se puede encontrar en productos como juguetes, botellas de leche, botes de champú, tuberías, menaje, etc. Generalmente a los plásticos contienen aditivos como retardantes de flama, estabilizadores, y oxidantes con el fin de mejorar sus propiedades físicas, esto genera que su degradación natural sea casi nula durante varios cientos de años (Barrick et al., 2021). Esto ha ocasionado, que su acumulación en vertederos, ambientes marinos y terrestres incrementa año con año generando problemáticas como contaminación de agua, reducción de espacio en los vertederos, obstrucción de alcantarillado, entre otros (Jiang et al., 2020).

Todas estas problemáticas pueden ser eliminadas a través de un manejo eficiente de los residuos plásticos, como es el reciclado o recuperación energética. Sin embargo, algunas técnicas de reciclaje tienen algunas desventajas como es un proceso de triturado y lavado del residuo y contaminación de agua. También, existen otras técnicas que evitan estas desventajas, pero resultan ser más complejas, como la degradación térmica (Aisien et al., 2021; Thahir et al., 2019; Wang et al., 2022). Sin embargo, esta última es uno de los métodos considerados como amigables con el medio ambiente.

Por lo tanto, la degradación térmica es un proceso sustentable en el manejo de residuos. El líquido obtenido se considera como una fuente energética, obteniendo también carbón sólido y gases de alto valor agregado (Fivga & Dimitriou, 2018). El proceso resulta en una significativa reducción en el volumen de los residuos, bajas temperaturas para su degradación, bajo costo de capital, y lo más importante, la recuperación energética a través de la generación de distintos productos (Vijayakumar & Sebastian, 2018).

Algunos autores como Abdulkareem y Eleburuiké (2008), estudiaron la degradación térmica del HDPE en

un reactor de acero inoxidable, a una temperatura de 430-520 °C.min⁻¹ durante 2 ½ horas. Los resultados mostraron un rendimiento líquido de 50,64 wt %, gaseoso de 15,74 wt % y sólido de 33,62 wt %. Además, de acuerdo con el análisis cromatográfica, el producto gaseoso mostro una composición química de C1- C5, y el producto líquido una composición de C8-C25.

Al-Salem y P. Lettieri (Al-Salem & Lettieri, 2010) estudiaron la degradación térmica del HDPE, los experimentos se realizaron mediante termogravimetría en un reactor montado en una micro balanza a una temperatura de 500-600 °C. Los resultados mostraron que a una temperatura de 500 °C se obtuvo un rendimiento líquido de 13,2 wt %, gases 20,2 wt %, ceras 65,8 wt %. A 550 °C un rendimiento líquido de 8 wt %, gas 32,8 wt %, ceras 58,2 wt %. A 600 °C el rendimiento líquido fue de 11 wt %, gas 43,7 wt % y mezcla 44,1 wt %.

Istoto et al., (Istoto et al., 2019) realizaron la degradación térmica de HDPE. Los ensayos fueron realizados con 5 kg de residuo previamente lavado y secado con un calentamiento de 4 horas a una temperatura entre 450 °C- 621 °C en un reactor de tipo batch. Los resultados mostraron una tasa de conversión de 99,5 wt %, en diversas fracciones, nafta 65 %, diesel 6 %, gasolina 17 %, gas 11,5 % y residuos 0,5 % aproximadamente.

De acuerdo con los estudios reportados, los factores más importantes en la degradación térmica son la temperatura y velocidad de calentamiento. Es por ello por lo que surge este trabajo, con el fin de evaluar estos dos parámetros y su efecto sobre los rendimientos líquidos, gaseosos y sólidos, con el objetivo de establecer la degradación térmica como un método alternativo al reciclaje tradicional.

MATERIAL Y MÉTODOS

Materiales

Los materiales utilizados para llevar a cabo este trabajo fueron: polietileno de alta densidad en forma de pellets (HDPE) y reactor de acero inoxidable semi-batch de 300 g de capacidad (Figura1).

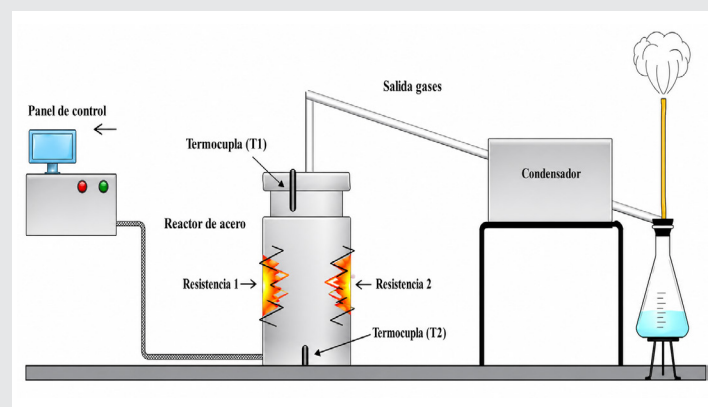


Figura 1.- Esquema experimental.

Fuente: Elaboración propia.

Metodología experimental y análisis de eficiencias:

Con base a la literatura se establecieron diferentes temperaturas con la finalidad de observar el comportamiento de los residuos plásticos. El procedimiento fue realizado a tres diferentes temperaturas (380, 420, 460 °C) y tres velocidades de calentamiento (15, 17, 23 °C/min) de calentamiento. Se utilizaron 250 g de HDPE en forma de pellets, y fueron ingresados en un reactor semi Batch de acero (Figura 1), a presión atmosférica. El reactor fue calentado mediante un par de resistencias eléctricas. La temperatura se monitoreó mediante dos termocuplas, una ubicada en la tapa del reactor (T1, Figura 1) y otra en la parte inferior del reactor (T2, Figura 1). Los experimentos se condujeron hasta alcanzar la temperatura de insignia, y se detuvieron hasta que la conversión termoquímica se detuvo.

La fase líquida/cerosa fue recolectada y separada, la fase gaseosa se liberó a la atmósfera de manera directa y el producto sólido se recuperó del reactor al finalizar cada prueba.

La degradación termoquímica consto de tres diferentes tipos de hidrocarburos, productos líquidos y gaseosos en mayor cantidad, y como residuos del proceso una fracción de carbón, su masa fue calculada de acuerdo con las diferencias de masas utilizando la ecuación 1 dada por (Miskolczi et al., 2009).

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^3 m_i} \cdot 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde m_i es la masa de los productos (1 = hidrocarburos gaseosos, 2 = hidrocarburos líquidos, 3 = carbón), el porcentaje de gas se determinó bajo diferencias de masas del producto líquido y el carbón (ecuación 2).

$$\text{Rendimiento (\%)} = 100 - m_l - m_{char} \quad \text{Ec. (2)}$$

RESULTADOS

Durante el proceso de descomposición térmica, se observa una continua regeneración de radicales y otros compuestos intermedios, lo que se conoce como el mecanismo de propagación. Estas reacciones en las cadenas moleculares finalmente culminan en la reagrupación de los radicales libres, los cuales logran su estabilización, marcando así la etapa final denominada mecanismo de terminación. En esta fase, todos estos radicales se estabilizan y dan origen a la formación de nuevos compuestos. (Shah et al., 2010) (Siddiqui & Redhwi, 2009).

Los mecanismos involucrados en el proceso de degradación son sensibles a la temperatura y a la rapidez del aumento de calor. Estos dos factores alteran las diversas etapas del proceso, lo que resulta en disparidades en los rendimientos de los productos resultantes (líquidos, ceras, gases, sólidos). La influencia de la temperatura y la velocidad de

calentamiento en los rendimientos de degradación térmica del HDPE se ilustra en la Figura 2.

Se ha observado que, en la mayoría de los casos, el índice de conversión termoquímica tiende a aumentar a temperaturas más elevadas. Este aumento se atribuye a la energía de activación necesaria para que el mecanismo de ruptura pueda afectar las cadenas de carbono-carbono (C-C). La mayor tasa de conversión se logró a una temperatura de 460 °C y una velocidad de calentamiento de 23 °C/min, obteniendo una tasa de conversión de casi un 98 % en peso (líquido/cera [36.8 % en peso], gases [61.2 % en peso]).

De acuerdo con Çit et al., (Çit et al., 2010), la degradación termoquímica de estos polímeros resulta principalmente en la formación de productos alifáticos, siendo los alcanos, alquenos y alquinos los más prominentes en términos de concentración.

Los resultados presentados indican una relación directa entre temperaturas más elevadas y tasas de conversión mejoradas, lo que conduce a la producción de productos líquidos/ceras y gases no condensables. Por otro lado, se observa que, a temperaturas más bajas, específicamente por debajo de 400 °C, las tasas de conversión son notablemente menos eficientes.

Con relación a las velocidades de calentamiento, desempeñan un papel crucial en las diversas etapas de los mecanismos de reacción, ya que pueden acelerar o retardar dichos procesos. Esta influencia se evidenció especialmente a una temperatura de 420 °C. Allí, una disminución en la velocidad de calentamiento resultó en un incremento en el rendimiento de líquidos/ceras. Por otro lado, a temperaturas inferiores a 400 °C, se observó una disminución en la tasa de conversión, lo que llevó a un aumento en la formación de compuestos sólidos o recalcitrantes.

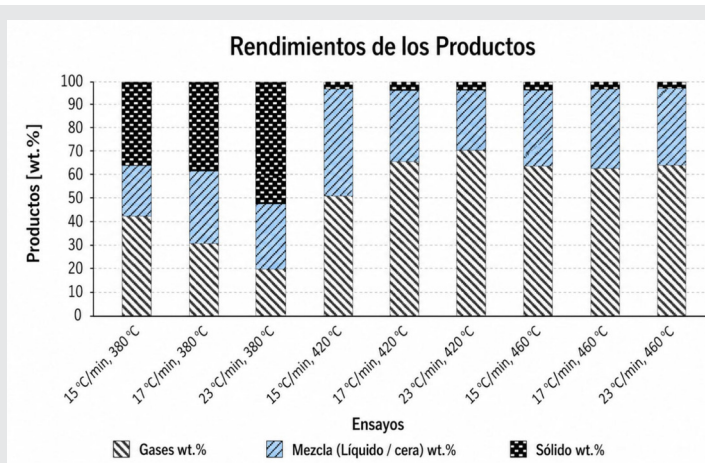
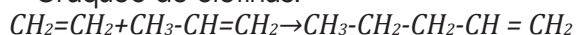


Figura 2. Rendimientos de los productos obtenidos de la degradación termoquímica del HDPE.

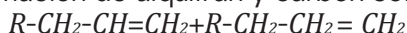
Fuente: Elaboración propia.

La preponderancia de compuestos recalcitrantes se atribuye principalmente a la descomposición de productos primarios como las olefinas. Este proceso provoca la despolimerización y conlleva a la formación de hidrocarburos de alto peso molecular, que posteriormente generan la producción de alquitrán y carbón sólido. Este fenómeno se ilustra en las reacciones a continuación:

Craqueo de olefinas:



Formación de alquitrán y carbón sólido



En este proceso, las olefinas experimentan una serie de reacciones de craqueo que dan como resultado la generación de compuestos de mayor complejidad molecular, los cuales finalmente contribuyen a la formación de alquitrán y carbón sólido.

El mecanismo reversible de radicales libres desempeña un papel fundamental en la génesis de productos como el alquitrán y el carbón sólido (Ballice & Reimert, 2002). Estas reacciones brindan oportunidades en ambas direcciones: en primer lugar, permiten la ruptura de enlaces C-C, lo que da lugar a la formación de compuestos de menor peso molecular; no obstante, también favorecen la generación de moléculas de mayor tamaño. A temperaturas más bajas, la movilidad de los radicales generados es limitada, lo que se refleja en los rendimientos significativos de productos sólidos obtenidos a una temperatura de 380 °C, alcanzando hasta un 54,6 % en peso. La mayor formación de alquitrán a temperaturas más bajas podría atribuirse a una escasa incisión o ruptura de los enlaces C-C. De acuerdo con Ishaq et al. (Ishaq et al., 2006), se necesita una energía superior a >68 kJ mol⁻¹ para lograr una ruptura efectiva de las cadenas C-C y, por ende, una mayor eficiencia en este proceso.

CONCLUSIONES

La tasa de degradación del HDPE depende significativamente de la temperatura y la velocidad de calentamiento. Cada uno de los mecanismos involucrados se ven directamente influenciado por estas variables. A temperaturas inferiores de 400 °C y con velocidades superiores a 23 °C. min⁻¹, se registra una alta tasa de conversión en compuestos recalcitrantes y limitada ruptura de las cadenas carbonadas C-C, inhibiendo la movilidad de los radicales para la formación de nuevos compuestos. En contraste a temperaturas superiores a los 400 °C, especialmente cercanas a los 460 °C, la tasa de conversión aumenta considerablemente llegando a tasas de conversión termoquímica superiores al 95 % en peso.

BIBLIOGRAFÍA

[1] K.-B. Park, Y.-S. Jeong, B. Guzelciftci, and J. S. Kim, "Two-stage pyrolysis of polystyrene: Pyroly-

sis oil as a source of fuels or benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes," *Applied Energy*, vol. 259, p. 114240, 2020.

[2] S. M. Al-Salem, A. Antelava, A. Constantinou, G. Manos, and A. Dutta, "A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW)," *Journal of Environmental Management*, vol. 197, no. 1408, pp. 177-198, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.03.084.

[3] E. T. Aisien, I. C. Otuya, and F. A. Aisien, "Thermal and catalytic pyrolysis of waste polypropylene plastic using spent FCC catalyst," *Environmental Technology and Innovation*, vol. 22, p. 101455, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101455.

[4] K. T. Kyaw, C. Su, and S. Hmwe, "Effect of Various Catalysts on Fuel Oil Pyrolysis Process of Mixed Plastic Wastes," *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 8, no. 5, pp. 794-802, 2015.

[5] *Plastics Europe*, "Plásticos - Situación en 2019," Madrid-España, 2019.

[6] C. Ma et al., "Catalytic pyrolysis of flame retarded high impact polystyrene over various solid acid catalysts," *Fuel Processing Technology*, vol. 155, pp. 32-41, 2017, doi: 10.1016/j.fuproc.2016.01.018.

[7] I. Kyrikou and D. Briassoulis, "Biodegradation of agricultural plastic films: A critical review," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 15, no. 2, pp. 125-150, 2007, doi: 10.1007/s10924-007-0053-8.

[8] R. Thahir, A. Altway, S. R. Juliastuti, and Susianto, "Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 70-77, 2019, doi: 10.1016/j.egy.2018.11.004.

[9] S. Wang et al., "Experimental investigation of plastic waste pyrolysis fuel and diesel blends combustion and its flue gas emission analysis in a 5 kW heater," *Energy*, vol. 247, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123408.

[10] A. Fivga and I. Dimitriou, "Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment," *Energy*, vol. 149, pp. 865-874, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.02.094.

[11] N. Patni, P. Shah, S. Agarwal, and P. Singhal, "Alternate Strategies for Conversion of Waste Plastic to Fuels," vol. 2013, 2013.

[12] A. S.A. and E. N. A., "PYROLYSIS OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE (HDPE) WASTE PRODUCTS INTO USEFUL FUELS," vol. 32, 2008.

[13] S. D. A. S. Ammar S. Abbas, "Pyrolysis of High-density Polyethylene for the Production of Fuel-like Liquid Hydrocarbon," vol. 9, no. 1, pp. 23-29, 2008.

[14] S. M. Al-Salem and P. Lettieri, "Kinetic study of high density polyethylene (HDPE) pyrolysis," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 88, no. 12, pp. 1599-1606, 2010, doi: 10.1016/j.cherd.2010.03.012.

[15] N. Miskolczi, A. Angyal, L. Bartha, and I. Valkai, "Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor," *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 7-8, pp. 1032-1040, 2009, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.04.019.

[16] J. Shah, M. R. Jan, F. Mabood, and F. Ja-been, "Catalytic pyrolysis of LDPE leads to valuable resource recovery and reduction of waste problems," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 12, pp. 2791-2801, 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2010.06.016.

[17] M. N. Siddiqui and H. H. Redhwi, "Pyrolysis of mixed plastics for the recovery of useful products," *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 4, pp. 545-552, 2009, doi: 10.1016/j.fuproc.2009.01.003.

[18] I. Çit, A. Sinağ, T. Yumak, S. Uçar, Z. Mırsirlioğlu, and M. Canel, "Comparative pyrolysis of polyolefins (PP and LDPE) and PET," *Polymer Bulletin*, vol. 64, no. 8, pp. 817-834, 2010, doi: 10.1007/s00289-009-0225-x.

[19] L. Ballice and R. Reimert, "Temperature-programmed co-pyrolysis of Turkish lignite with polypropylene," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 65, no. 2, pp. 207-219, 2002, doi: 10.1016/S0165-2370(01)00195-4.

[20] M. Ishaq, I. Ahmad, M. Shakirullah, M. A. Khan, Habib ur Rehman, and A. Bahader, "Pyrolysis of some whole plastics and plastics-coal mixtures," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 18-19, pp. 3216-3223, 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2006.02.019.





Ciencias *de la* Computación

Ingeniantes

Prototipo IoT para la desinfección de frutas y hortalizas por aspersión o inmersión



Colaboración

Heriberto Domingo Santiago, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Walter Ariel Silva Martínez, Universidad Autónoma del Carmen; Eduardo Fernández Echeverría, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla; Luis Enrique García Santamaría; Gregorio Fernández Lambert, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 24 de septiembre de 2025

Fecha de aceptación: 05 de mayo de 2026

Autor de Correspondencia: Eduardo Fernández Echeverría

RESUMEN: Se diseñó y validó un prototipo soportado en el microcontrolador ESP32 como control para la desinfección de frutas y hortalizas por aspersión o inmersión en tiempo real en contextos agrícolas. La arquitectura del presente sistema de desinfección se diseñó pensando en la necesidad de pequeños productores agrícolas para disponer de tecnologías económicas y flexibles para su instalación en comunidades en ausencia de infraestructura inmueble e instalaciones rigurosamente fijas. El prototipo transmite datos vía Wi-Fi a una plataforma en línea y fue calibrado comparativamente frente a instrumentos comerciales. Se realizaron pruebas controladas utilizando papa y chayote en un entorno simulado, con condiciones de temperatura y humedad constantes, realizando un total de 15 ciclos de desinfección para validar el prototipo. Los resultados mostraron una precisión mayor al 95 % y estabilidad operativa. El sistema de desinfección de frutas y verduras es replicable y ajustable para aplicaciones rurales y ahorro del agua de desinfección.

PALABRAS CLAVE: IoT, ESP32, sensores, calidad del agua, agricultura, monitoreo remoto.

ABSTRACT: A low-cost prototype supported by the ESP32 microcontroller was designed and validated as a control system for the real-time disinfection of fruits and vegetables through spraying or immersion in agricultural settings. The architecture of this disinfection system was conceived to address the needs of small-scale farmers, providing affordable and flexible technologies that can be installed in communities lacking permanent infrastructure or fixed facilities. The prototype transmits data via Wi-Fi to an online platform and was calibrated against commercial instruments. Results demonstrated an accuracy above 95% and stable operation. The fruit and vegetable disinfection system is replicable and adaptable for rural applications, while also contributing to water savings in the disinfection process.

KEYWORDS: IoT, ESP32, sensors, water quality, agriculture, remote monitoring.

INTRODUCCIÓN

En México y en gran parte de América Latina, los productores agrícolas rurales enfrentan severas limitaciones para posicionar sus cosechas en cadenas comerciales estructuradas que vayan más allá de los mercados locales o rodantes. Esta situación se relaciona no sólo con factores de escala productiva, sino con la carencia de infraestructura tecnológica que les permita cumplir con estándares mínimos de calidad, inocuidad y trazabilidad exigidos por centros de distribución, supermercados y agroindustrias [1, 2].

Una de las principales limitaciones para mejorar la colocación de sus cosechas en anaqueles comerciales, es la ausencia de sistemas de desinfección utilizada en la fase de postcosecha. El uso de agua contaminada para lavado, hidratación o fertirrigación representa un riesgo tanto para la salud del consumidor como para el rechazo de productos frescos en mercados más exigentes a los rodantes [3]. La inocuidad alimentaria, por tanto, no depende únicamente del manejo agronómico, sino también de la adopción de tecnologías accesibles en las actividades postcosecha, la cual ha sido un componente esencial en procesos agrícolas [4], permitiendo el incremento de rendimientos económicos al productor agrícola [5]. Dentro de la innovación tecnológica que se ha desarrollado en el campo de la agricultura se encuentran tecnologías que aportan un valor en diferentes áreas como lo son tecnologías para el rendimiento de suelos, sistemas de riego, y sistemas de desinfección en particular, que es el campo que se está tocando en este artículo.

Comercialmente existen sistemas de inmersión y aspersión dedicados al lavado y desinfección de frutas y hortalizas. Por mencionar algunas son: la Brush Washer de JBT es una lavadora específicamente para la limpieza exterior de los frutos usando un detergente espumoso combinado con cepillos para eliminar la suciedad y los residuos [6]. Así también la lavadora GewaV 5000 Plus la cual es una lavadora para grandes volúmenes de vegetales la cual tiene un tanque elevado en el que se eliminan suciedades que son separadas de la corriente que lleva el producto. Estos restos son arrastrados a una estructura posicionada en el fondo del tanque que realiza la operación de lavado. De este modo, se previene que las impurezas entren nuevamente en contacto con el producto ya higienizado. Sin embargo, en todas estas tecnologías al final se requiere descargar el agua una vez que ha cumplido su función. Aunque los sólidos en suspensión y sedimentados pueden pasar desapercibidos en el proceso, no ocurre así con el detergente o el desinfectante que acompaña dichas descargas. Estas tecnologías se insertan como una operación al proceso de lavado de manera fija ocupando un espacio determinado; haciendo esto, por una parte, más compleja la manipulación e instalación de la tecnología en espacio particular, y la compra de esta tecnología para la población de productores agrícolas o de traspatio de zonas rurales.

Una de las tecnologías que ha causado impacto en la productividad agrícola es el hardware y software libre orientados al modelo "hazlo tú mismo" que da la oportunidad de ser los propios creadores de productos con baja inversión, y con grandes beneficios [7]. En este contexto, las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) han ganado atención por su capacidad de ofrecer soluciones de baja inversión que puede oscilar entre los 20,000.00 MXN, según el control que se requiera, personalizables, y adaptables a comunidades agrícolas

rurales sin posibilidad de invertir en tecnologías comerciales con exigencias en infraestructura para su instalación, a la cual se suma la mano de obra especializada para su operación y mantenimiento. En particular, el uso de microcontroladores, actuadores, junto con sensores de variables físico-químicas, permite construir sistemas de monitoreo en tiempo real que antes eran impensables para el pequeño agricultor por su alto costo o complejidad operativa [8, 9].

El sistema que se presenta en este artículo responde a esa necesidad: un prototipo funcional en IoT para el monitoreo de parámetros críticos del agua: Desinfectante medido a través del pH, turbidez, temperatura del agua de desinfección, y el nivel del agua de desinfección. Un prototipo funcional que puede ser integrado en espacios agrícolas sin infraestructura específica para su operación. La solución que se presenta en este artículo fue diseñada de manera que pueda instalarse y adaptarse en espacios de huertos familiares traspatio, comunitarios o módulos de producción diversificada; permitiendo a los pequeños agricultores practicar el proceso de desinfección, y con ello proporcionarles el valor agregado a sus productos agrícolas, frutos y hortalizas.

Por otra parte, el monitoreo y cuidado constante de la calidad del agua es crítico en la agricultura moderna, lo que requiere el manejo eficiente del recurso [8]; toda vez que, en regiones rurales existen limitaciones económicas y de infraestructura que dificultan la implementación de soluciones tecnológicas avanzadas. El uso de sistemas embebidos como el ESP32 permite desarrollar alternativas accesibles y eficientes para comunidades con recursos limitados [9].

Este artículo describe paso a paso la construcción de un prototipo de sistema IoT que integra sensores electrónicos, conectividad Wi-Fi, y almacena datos en plataformas remotas; pensado para mejorar prácticas agrícolas en zonas rurales carentes de infraestructuras inmuebles y tecnológicas. De esta forma, a través de una arquitectura basada en ESP32, sensores de bajo consumo energético, actuadores, y conectividad inalámbrica, se ofrece una alternativa viable para zonas rurales con conectividad intermitente y presupuesto limitado. El sistema IoT aquí expuesto puede contribuir no sólo al cumplimiento de buenas prácticas agrícolas, sino también al fortalecimiento de circuitos cortos de comercialización con valor agregado certificado por el propio productor. En este artículo, aunque la validación experimental se ha realizado en un sistema de desinfección por inmersión, el sistema propuesto es también adaptable a aplicaciones por aspersión, lo cual amplía su aplicabilidad en procesos de lavado de frutas y hortalizas.

MATERIAL Y MÉTODOS

El prototipo portátil para la desinfección de frutas y hortalizas se diseña para atender la necesidad de disponer

de una tecnología de bajo costo y accesible para productores de baja escala de producción agrícola, producción traspatio, y que no requiere de infraestructura inmueble establecida.

Esta tecnología es diseñada para adaptarse a configuraciones según la posibilidad del pequeño agricultor para incrementar el valor agregado comercial a sus cosechas agrícolas. Con este propósito se seleccionan materiales electrónicos de uso comercial y de fácil adquisición. El funcionamiento fue validado ejecutando pruebas en un ambiente agrícola desinfectando papa y chayote simultáneamente durante tres días de funcionamiento (72 horas), comparando los sensores electrónicos con equipos de referencia analógicos y digitales. De esta misma forma, la calibración de actuadores de consumo de corriente se validó mediante equipos de prueba e instrumentos estándar (Figura 1).

- Sensor ultrasónico HC SR04: estima el nivel de agua en tanques.
- Plataforma Arduino Cloud para visualización remota de datos.
- Válvula solenoide de agua 12 V.
- Bomba de agua de 12 V 130 Psi Autoprím diafragma.
- Calentador eléctrico para agua.
- Filtro de agua.

La construcción del prototipo de desinfección de frutas y hortalizas, como puede observarse en la Figura 2, inicia con identificar las variables del proceso de desinfección. Posteriormente se identifican y definen los elementos y actuadores que conforman la operación de este prototipo, para entonces definir la arquitectura del sistema de desinfección. Finalmente se ensambla el prototipo de desinfección.

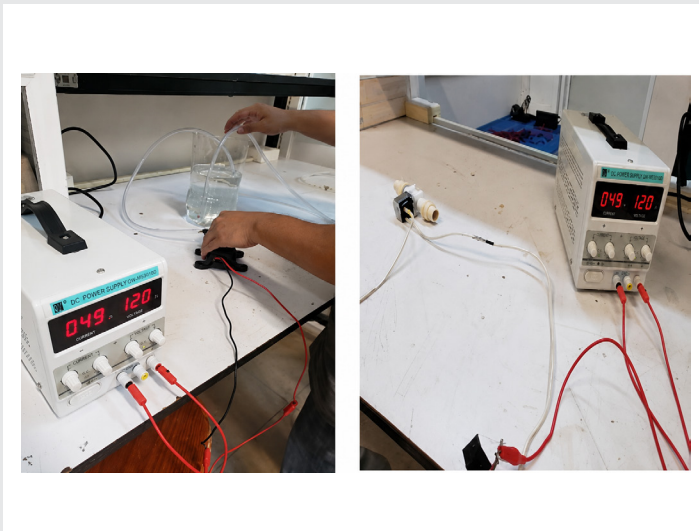


Figura 1. Calibración y Medición de Actuadores.
Fuente: Pruebas de campo.

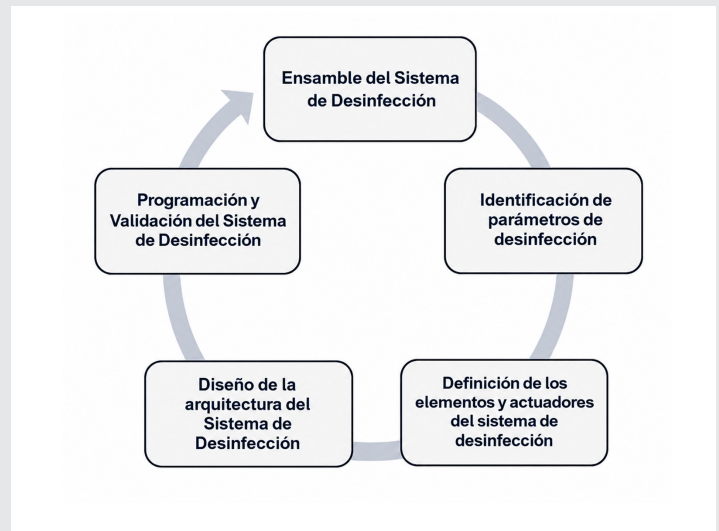


Figura 2. Diseño, programación y ensamble del sistema de desinfección.
Fuente: Diseño propio.

Los datos se analizaron mediante cálculo de error absoluto medio (MAE) y coeficiente de correlación (r).

El prototipo portátil para la desinfección de frutas y hortalizas se integró con los siguientes elementos y actuadores:

Para la elección de los componentes se cuidó que éstos fueran de distribución nacional, accesibles a través de plataformas comerciales, sin mayor requisito que su especificación.

- Microcontrolador ESP32 WROOM 32U, que permite conectividad Wi Fi integrada y control de periféricos.
- Sensor de pH DFRobot: mide niveles de acidez con un rango de 0-14 pH.
- Sensor de turbidez SEN0189: detecta partículas suspendidas en NTU.
- Sensor de temperatura DS18B20: ofrece mediciones precisas (-55 °C a 125 °C).

La programación del sistema de desinfección se realizó implementando rutinas de calibración por triplicado para cada sensor con protocolos para envíos automáticos cada 5 minutos provocando la variable.

RESULTADOS

Arquitectura y lógica del prototipo

La Figura 2 describe la lógica del funcionamiento y arranque del sistema de desinfección. Puede observarse que el arranque de este sistema inicia detectando el nivel de agua en el contenedor que el usuario ocupe para la desinfección de sus productos agrícolas. Una vez alcanzado el nivel, los sensores inician las lecturas de sus valores dentro de los umbrales que fueron establecidos en la programación del sistema. En esta lógica, la tarjeta lógica ESP32 funciona como el controlador principal conectando todos los elementos para su monitoreo y control. En primer lugar, se desarrolló un código inicial específico para la placa

Arduino-Uno cuya función principal es la codificación de las lecturas de los sensores. Este código fue diseñado para adquirir los datos desde los sensores y transmitirlos a través de comunicación serial al microcontrolador principal. Posteriormente, se elaboró el código fuente completo que integra y controla todo el sistema. Este segundo código fue compilado y cargado en la tarjeta ESP32, la cual, como se ha mencionado, actúa como unidad central del sistema. El ESP32 se encarga de recibir la información enviada por el Arduino Uno mediante comunicación serial e interpretar las lecturas de todos los sensores involucrados (nivel, temperatura, pH y turbidez de agua), y controlar los diferentes actuadores (válvulas, bomba, calentador) de acuerdo con la secuenciación definida en la Figura 3.

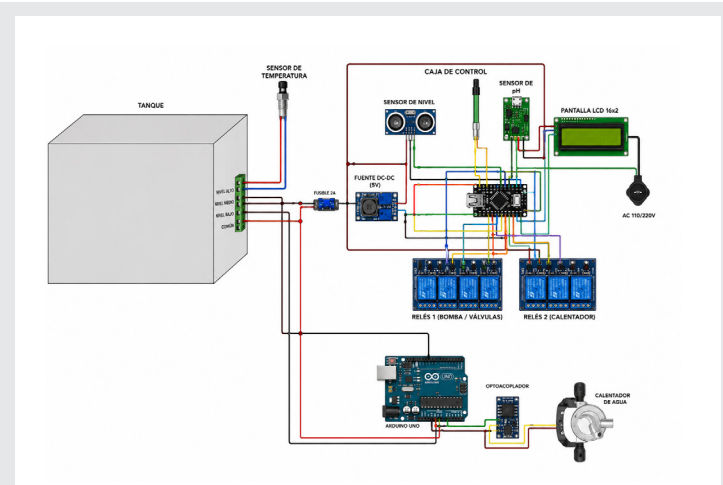


Figura 4. Representación general de la interconexión de los componentes electrónicos en el gabinete.

Fuente: Elaboración propia con apoyo del Software Fritzing.

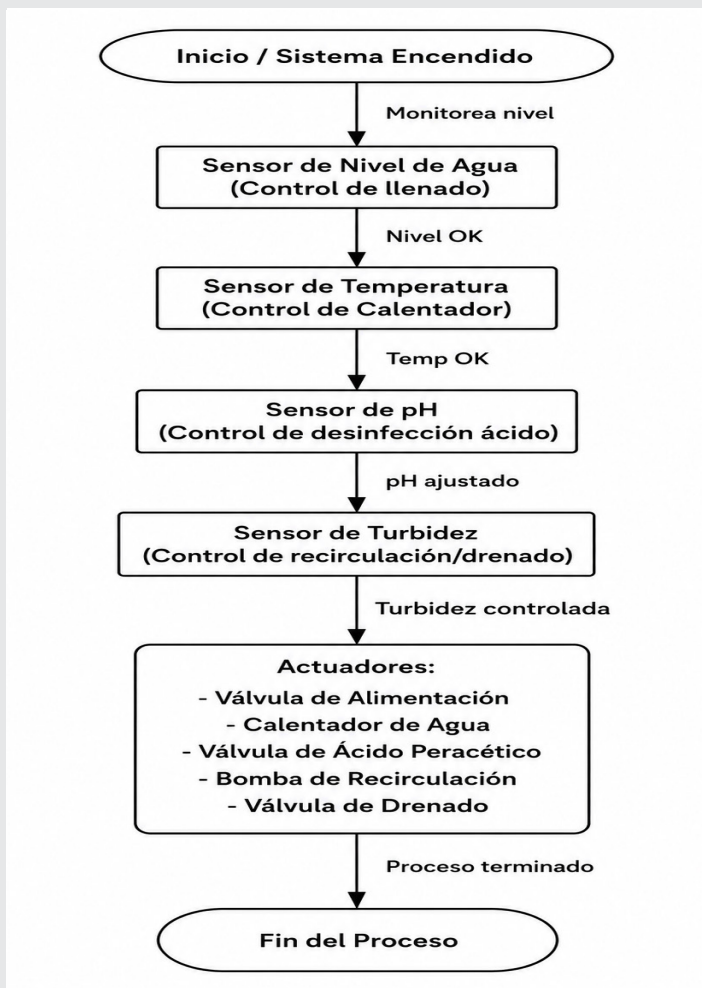


Figura 3. Inicio del flujo del sistema lógico.

Fuente: Diseño propio.

La Figura 4, representa la conexión general de los componentes electrónicos, los cuales se ubican dentro de un gabinete. En este mismo gabinete, se realiza la conexión general de los actuadores: bombas, válvulas. Mientras que, la Figura 5 describe la interacción de los elementos que integran el sistema y la tarjeta ESP32 que funciona como controlador principal, la cual ha demostrado su utilidad como unidad de control en sistema de desinfección de frutas y verduras [10].

Con esta configuración de conexiones descritas en la Figura 5, el ESP32 gestiona todo el sistema de desinfección de frutas y hortalizas, asegurando un control eficiente de los parámetros mediante la integración de sensores, actuadores, almacenamiento en tarjeta SD y comunicación con la nube mediante IoT con Wifi como se ha demostrado su factibilidad [11] (ver la Tabla 1).

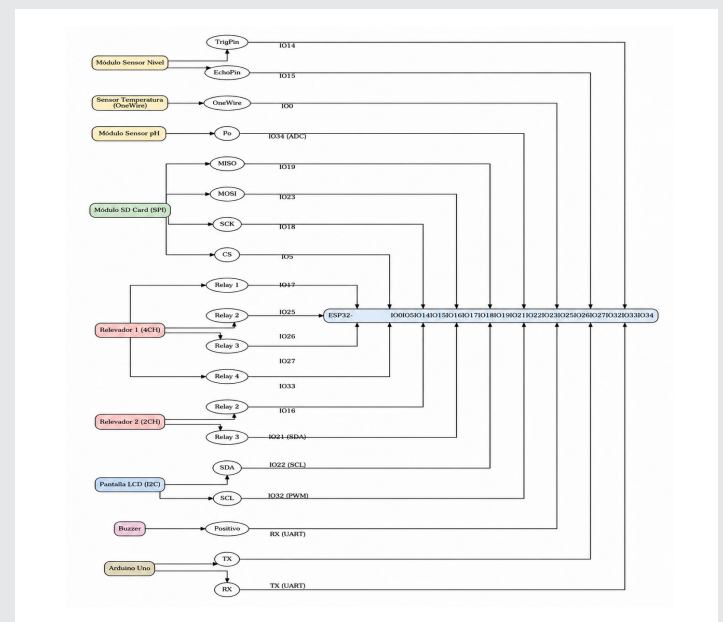


Figura 5. Interconexión de componentes electrónicos.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1, se describen las conexiones que se realizan a la placa de Arduino Uno, donde se conecta el sensor de turbidez por medio del módulo de turbidez. Mientras que, las conexiones de los actuadores (válvulas, bomba de agua, calentador de agua y filtro de agua) se conectaron a los bloques del relevador 1, conectándose también con los voltajes positivo y ne-

gativo de la fuente poder de 12 V DC. La bomba de agua se conecta con el bloque 3 del relevador 2 y el calentador de agua se conecta con el bloque 2 del relevador 2.

Tabla 1 Relación de conexiones de componentes electrónicos con Arduino-Uno.

Elemento		Arduino
Nombre	Pin	Pin Arduino
Módulo sensor de Turbidez	Vcc	5v
	Gnd	Gnd
	A	A0

Fuente: Elaboración propia.

Variables de control

El Sistema de Desinfección mide y controla las variables a través de sensores y actuadores descritos en la Tabla 2.

Tabla 2 Relación de conexiones de componentes electrónicos con Arduino-Uno.

Variable	Descripción
Nivel de agua	Esta variable se controla a través del sensor de distancia HC-SR04 (Q) y una válvula de agua solenoide (U) que permite la alimentación de agua.
Temperatura del agua	Esta variable se controla a través del sensor de temperatura de agua (R) y el calentador de agua (W).
pH del agua	Esta variable se controla a través del sensor de pH (S) y una válvula de agua solenoide (U) que permite dosificar el desinfectante.
Turbidez del agua	Esta variable se controla a través del sensor de turbidez (T), una válvula de agua solenoide (U) que abre el paso a la recirculación de agua, una bomba de agua (V) para recircular el agua por medio de la instalación hidráulica y una válvula de agua solenoide (U) que permite desaguar el agua.

Fuente: Elaboración propia.

Calibración de sensores

Calibración del sensor de pH

Se utilizaron tres medidas de pruebas para calibrar el sensor de pH Figura 6. Una prueba con pH de 4.0, otra prueba con 7.0 de pH y otra prueba de 10.0 de pH. La conexión de la prueba se realizó con el módulo del sensor a una placa Arduino; se le compila el código a la tarjeta de Arduino desde el Arduino IDE. Se ingresó la sonda del sensor de pH a la solución a cada una de estas soluciones buffer.

Calibración del sensor de distancia

La calibración del sensor de distancia HC-SR04 consiste en comparar la distancia que mide el sensor con

una distancia conocida como se muestra en la Figura 7. Para esto se conectó el sensor HC-SR04 con la placa de Arduino Uno, utilizando el código de programación bajado de internet que corresponde a dicho sensor. El resultado de la medición del sensor corresponde a la misma distancia conocida.

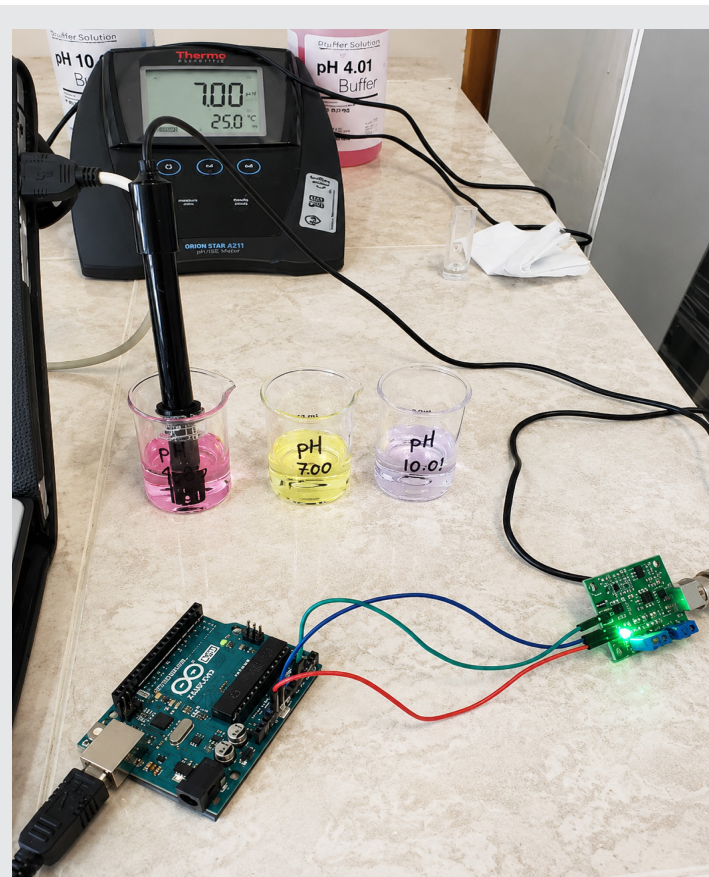


Figura 6. Calibración del sensor de pH.

Fuente: Estudio de campo.

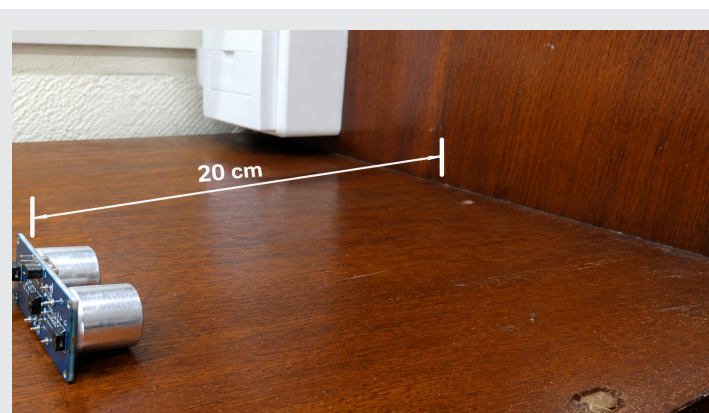


Figura 7. Calibración del sensor de distancia.

Fuente: Estudio de campo.

Calibración del sensor de temperatura

La calibración del sensor de temperatura, en este caso, se realiza con apoyo del sensor de temperatura DS18B20 y una placa de Arduino Uno.

Se sumergió el sensor de temperatura en el interior de un recipiente con agua donde también se encuentra un controlador de temperatura con termostato que se reguló a una temperatura de 28 °C Figura 8.



Figura 8. Calibración del sensor de temperatura.
Fuente: Estudio de campo.

Calibración del sensor de turbidez

Se llevó a cabo el proceso de calibración del sensor de turbidez TS-300B utilizando agua con diferentes cantidades de colorante Figura 9. La calibración del sensor de turbidez TS-300B con agua limpia obtuvo un resultado de 743 NTU. La calibración del sensor de turbidez TS-300B con agua con 30% peso/volumen de colorante se obtuvo un resultado de 2224 NTU.

La calibración del sensor de turbidez TS-300B con agua y con 60% peso/volumen se obtuvo un resultado de 2981 NTU.

Para la calibración del sensor de turbidez TS-300B se utilizó la Ecuación 1:

$$(-1120.4)(v) + (5742.3)(v) - 4352.9 \quad \text{Ec. (1)}$$

en donde;

v; es el voltaje que alimenta al sensor.

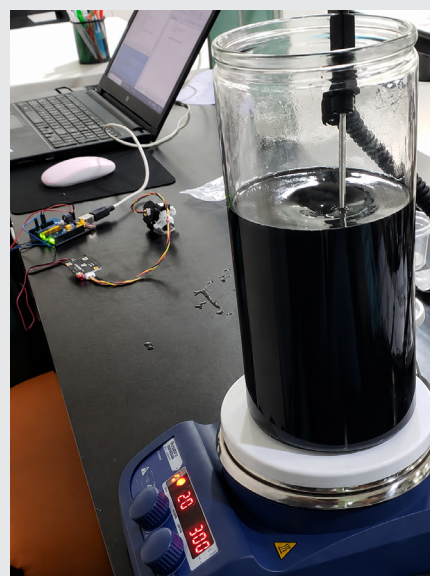


Figura 9. Calibración del sensor de turbidez.
Fuente: Estudio de campo.

Los análisis revelaron una precisión superior al 95 %. El coeficiente de correlación fue de $r= 0.98$ para el sensor de pH y $r= 0.95$ para turbidez, con un MAE inferior al 5 % en ambos parámetros. La temperatura se midió con una desviación de ± 0.3 °C, y el nivel con un margen de error <3 %.

El consumo energético que operó en modo continuo fue de aproximadamente 150 mA, lo que permite su uso con paneles fotovoltaicos.

Instalación de sensores y actuadores

Los sensores que monitorean los parámetros del sistema salen del gabinete y se sumergen en el depósito de agua que se utilice para la operación de la desinfección de frutas y hortalizas Figura 10.

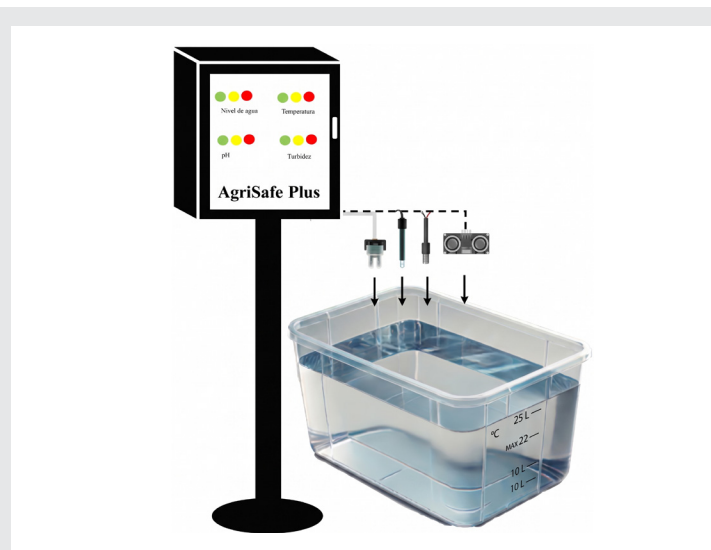


Figura 10. Representación gráfica del gabinete e inmersión de sensores en agua.
Fuente: Estudio de campo.

La Figura 11 representa gráficamente los elementos del sistema hidráulico conformado por actuadores y sensores. Mientras que la Figura 12, describe la interconexión de sensores con actuadores en el sistema de desinfección.

La Figura 13 detalla el Prototipo del Sistema de Desinfección de Frutas y Verduras en la que puede observarse una representación gráfica de los elementos posicionados en una arquitectura en la que normalmente puede instalarse en un depósito según las necesidades del agricultor.

La validación del sistema se realiza durante 72 horas de servicio mediante 15 ciclos de desinfección. Los valores medidos se contrastaron contra mediciones físicas de mediciones de transmitancia, así como con instrumentos como un potenciómetro, y termómetro.

El agua reincorporada en este periodo de evaluación fueron 5.5 L.

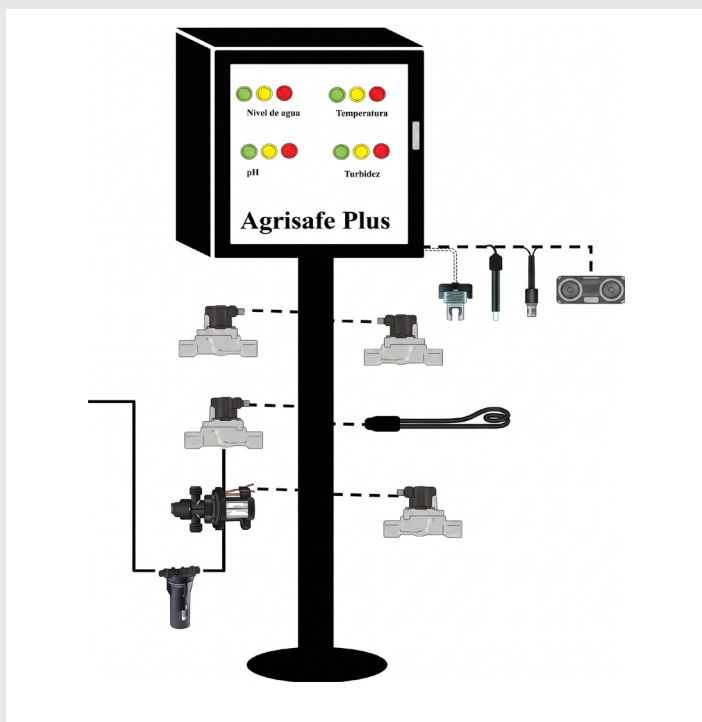


Figura 11. Interconexión de sensores y actuadores. Fuente: Estudio de campo.

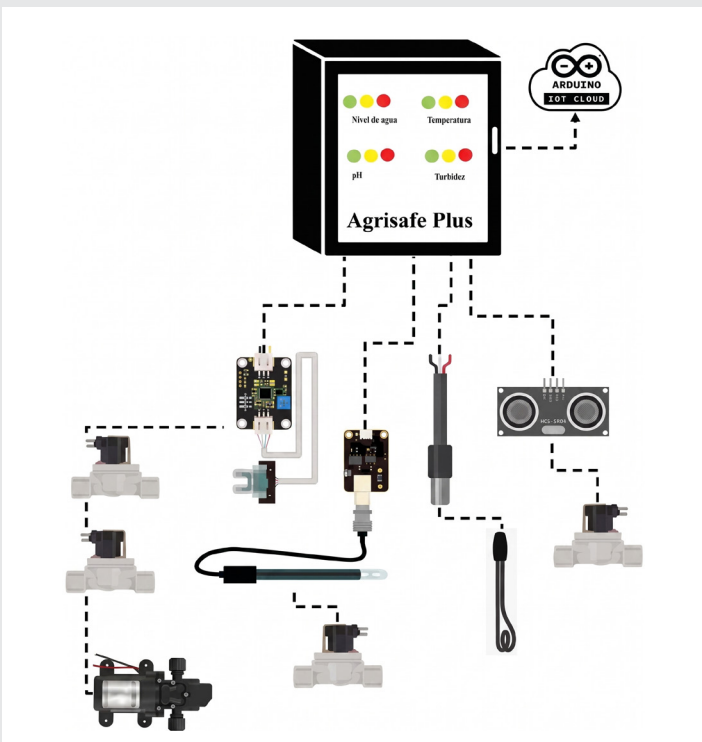


Figura 12. Interconexión de sensores y actuadores. Fuente: Estudio de campo.

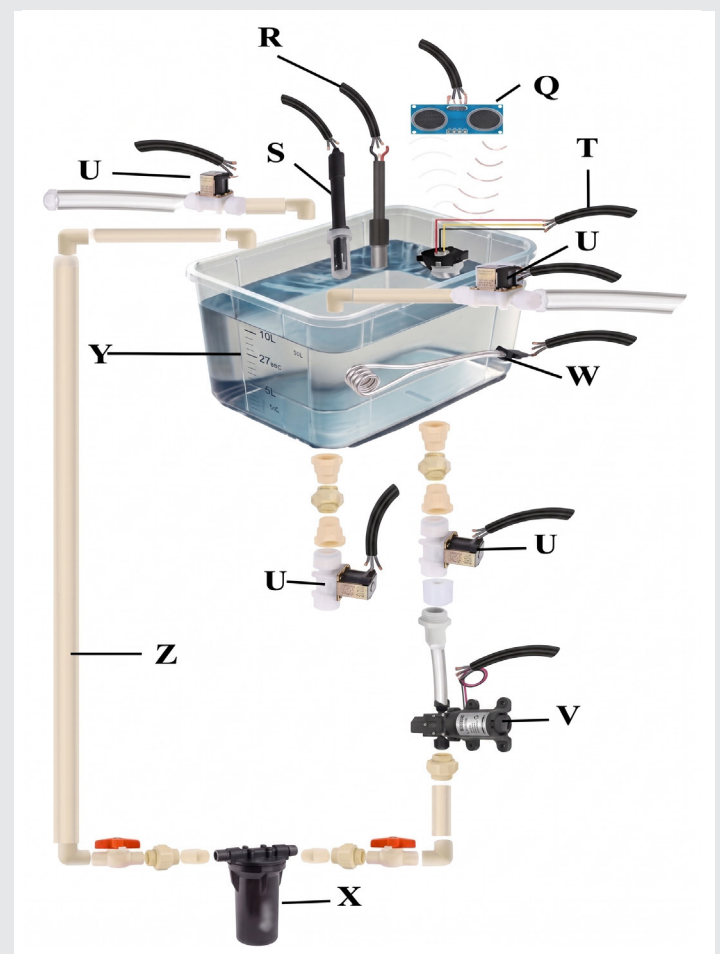


Figura 13. Sistema de Desinfección de frutas y hortalizas. Fuente: Diseño propio.

Q) Sensor de distancia | R) Sensor de temperatura | S) Sensor de pH | T) Sensor de turbidez | U) Electroválvula | V) Bomba de agua | W) Calentador de agua | X) Filtro de agua | Y) Depósito de agua | Z) Instalación hidráulica

La Figura 14 presenta el sistema en funcionamiento en uno de los 15 ciclos del proceso de sanitización de papa y chayote.



Figura 14. Sistema de Desinfección de frutas y hortalizas.
Fuente: Imagen propia.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema IoT eficiente para monitorear la calidad del agua en el ámbito agrícola rural para la desinfección de frutas y hortalizas. Al demostrar precisión en contraste con mediciones físicas del 98%, estabilidad en el consumo de agua al incorporar durante 15 ciclos en 72 horas de lavado, sólo 5.5 L de agua; demostrando de esta forma el sistema de desinfección su contribución sustentable.

Con base en estos resultados, se recomienda su implementación en proyectos de campo y su ampliación con interfaces web de gestión y alertas automáticas.

Esta "Tecnología portátil para la desinfección de frutas y hortalizas en comunidades rurales" ofrece al productor agrícola un medio para agregar valor comercial a su cosecha y proporciona una solución adaptable y sustentable a las necesidades y recursos de los pequeños productores, mejorando así sus ventajas competitivas para su inserción en cadenas comerciales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México por el proyecto financiado TECNM 22343.26-PD.

BIBLIOGRAFÍA

[1] SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2018). Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para la producción primaria de vegetales frescos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/427849/Manual_BPA_Vegetales_Frescos.pdf.

[2] FAO. (2020). Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe 2020. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cb2242es>.

[3] Castillo, A., Villarruel-López, A., Navarro-Hidalgo, V., & Lugo, J. (2021). Evaluación microbiológica de agua usada en la producción de hortalizas frescas: riesgos y alternativas para el control de patógenos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(2), 239-251. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i2.2489>.

[4] Chanki Pandey, P. K. S., Behera, S. K., Vishwakarma, J., & Tande, V. (2022). Smart agriculture: Technological advancements on agriculture—A systematical review. In *Deep Learning for Sustainable Agriculture* (pp. 1-56). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85214-2.00002-1>.

[5] Pingali, P. L. (2012). Green revolution: Impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(31), 12302-12308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>.

[6] Bello José Ascencio, P., Autónoma de Guerrero, U., & Roberto Aranda Benito, M. (2024). Sistema de maduración de frutas mediante la implementación de Arduino. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(6), 7499-7519. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V8I6.15445.

[7] Chora García, D., Álvarez Martínez, G., & Espinoza García, M. (2018). Raspberry Pi y Arduino: semilleros en innovación tecnológica para la agricultura de precisión. *Informática y Sistemas: Revista de Tecnologías de la Informática y las Comunicaciones*, 2(1), 74. <https://doi.org/10.33936/ISRTIC.V2I1.1134>.

[8] Bogdan, R., Paliuc, C., Crisan Vida, M., Nimara, S., & Barmayoun, D. (2023). Low cost Internet of Things water quality monitoring system for rural areas. *Sensors*, 23(8), 3919. <https://doi.org/10.3390/s23083919>.

[9] Naloufi, M., Abreu, T., Souihi, S., Therial, C., Rodrigues, N. A. d. P., Le Goff, A. G., & Lucas, F.

S. (2024). Long term stability of low cost IoT system for monitoring water quality in urban rivers. *Water*, 16(12), 1708. <https://doi.org/10.3390/w16121708>.

[10] Chaudhari, L. B., Kapse, S., Bathe, V., Sakhare, S., & Mahadik, S. (2025). Low cost fruit sanitization using ESP module. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 12(3), 407-413. <https://ijsrset.com/index.php/home/article/view/IJSRSET251257>.

[11] Correa Quiroz, J. J., Toribio Barrueto, M. A., & Castro Vargas, C. (2025). IoT system with ESP32 for smart drip irrigation and climate monitoring in greenhouses. *Emerging Science Journal*, 9(3), June 2025. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-03-01>





Bioquímica
y
Biológicos

Ingeniantes

El Xilitol, un edulcorante de alto valor agregado en la industria obtenido a partir de residuos lignocelulósicos

RESUMEN: El Xilitol ($C_5H_{12}O_5$) es un polialcohol de cinco carbonos con alto poder edulcorante y bajo valor calórico, utilizado en las industrias alimentaria y farmacéutica por sus propiedades anticariogénicas y su adecuada tolerancia en pacientes diabéticos. Su producción comercial se realiza por hidrogenación química de xilosa, un proceso costoso que ha impulsado la búsqueda de alternativas biotecnológicas a partir de residuos lignocelulósicos. En este trabajo se aislaron, seleccionaron y caracterizaron levaduras productoras de Xilitol a partir de diversas fuentes biológicas. Se obtuvieron 69 cepas capaces de crecer en medios con xilosa como fuente de carbono, de las cuales 14 mostraron capacidad de producir Xilitol. Las mayores concentraciones y productividades se obtuvieron en cepas provenientes de corteza de árbol de ciruela (*Spondias purpurea*), destacando CC2 y CC5 con hasta 11.8 g/L y productividades cercanas a 0.16 g/Lh. Cepas de cáscara de coco (*Astrocaryum mexicanum*), alcanzaron hasta 9 g/L con productividades de hasta 0.124 g/Lh, mientras que las de ciruela roja produjeron entre 1.5 y 3.0 g/L. Los aislados de bagazo y jugo de caña mostraron producciones menores (entre 1-2.4 g/L). Los resultados demuestran el potencial de las levaduras autóctonas para la producción biotecnológica de Xilitol, contribuyendo al aprovechamiento de residuos lignocelulósicos y al desarrollo de bioprocesos sustentables y de valor agregado.

PALABRAS CLAVE: Aislamiento, Selección, Xilitol, Levaduras, Edulcorante.



Colaboración

Tyana Betsaida Aguilar Pastelín; María Guadalupe Aguilar Uscanga; María Inés Infanzón Rodríguez; Daniel Arturo Zavala Ortiz; Javier Gómez Rodríguez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Veracruz

Fecha de recepción: 18 de diciembre de 2024

Fecha de aceptación: 04 de marzo de 2026

Autor de Correspondencia: Javier Gómez Rodríguez

ABSTRACT: Xylitol ($C_5H_{12}O_5$) is a five-carbon polyalcohol with high sweetening power and low caloric value, used in the food and pharmaceutical industries for its anticariogenic properties and good tolerability in diabetic patients. Its commercial production is carried out by the chemical hydrogenation of xylose, a costly process that has driven the search for biotechnological alternatives using lignocellulosic waste. In this work, Xylitol-producing yeasts were isolated, selected, and characterized from various biological sources. Sixty-nine strains capable of growing in media with xylose as a carbon source were obtained, of which 14 showed the capacity to produce Xylitol. The highest concentrations and productivities were obtained in strains derived from plum tree bark (*Spondias purpurea*), notably CC2 and CC5, with concentrations up to 11.8 g/L and productivities close to 0.16 g/Lh. Strains from coconut husk (*Astrocaryum mexicanum*) reached yields of up to 9 g/L with productivities of up to 0.124 g/Lh, while those from red plum produced between 1.5 and 3.0 g/L. Isolates from bagasse and sugarcane juice showed lower yields (between 1-2.4 g/L). These results demonstrate the potential of indigenous yeasts for the biotechnological production of Xylitol, contributing to the utilization of lignocellulosic waste and the development of sustainable, value-added bioprocesses.

KEYWORDS: Isolation, Selection, Xylitol, Yeasts, Sweetener.

INTRODUCCIÓN

El Xilitol, también conocido como azúcar de abedul es un polialcohol de cinco carbonos presente en pequeñas cantidades en ciertas frutas y vegetales tales como: la ciruela, fresas, calabaza, y algas, entre otros; recientemente ha ganado re-

conocimiento debido a su versatilidad en la industria alimentaria y farmacéutica, debido a que se utiliza como edulcorante y se encuentra en productos como pasta de dientes, enjuagues bucales, pasteles, dulces y chicles sin azúcar [1, 2]. El Xilitol tiene el mismo poder edulcorante que la sacarosa, pero con un valor de energía (calorífico) de solo 2.4 kcal/g, comparado con 4 kcal/g que contiene la sacarosa [3].

Así también, se emplea en productos farmacéuticos, cosméticos y en aplicaciones industriales y técnicas [4]. Se ha reportado que el Xilitol tiene propiedades anticariogénicas y que es un producto que no produce caries ya que los microorganismos presentes en la boca no pueden metabolizarlo [5]. Además, se recomienda a pacientes diabéticos ya que puede ser metabolizado (absorción directa, principalmente en el hígado, y metabolismo indirecto por bacterias intestinales) en ausencia de la insulina, causando un ligero incremento en los niveles de glucosa e insulina en la sangre en comparación con los cambios causados por la glucosa o sacarosa. Otra propiedad interesante que tiene el Xilitol es que no reacciona con los aminoácidos, es decir no participa en las reacciones de Maillard, permitiendo su utilización para nutrición parenteral [6].

Actualmente la producción comercial del Xilitol se lleva a cabo mediante la hidrogenación usando D-xilosa como materia prima y con catalizadores químicos, alta temperaturas y presión, siendo éste un proceso costoso, el cual impacta directamente con el precio en el mercado del Xilitol (entre \$500 y \$3000 pesos M.N. de acuerdo al grado de pureza) [7]. Una alternativa al proceso químico, es el proceso biológico, el cual usa residuos lignocelulósicos que contienen el sustrato (xilosa), que se puede convertir a Xilitol bajo la acción de levaduras principalmente [8]. Las levaduras son los microorganismos más utilizados para este fin, debido a su capacidad de fermentar sustratos ricos en pentosas y hexosas y a su reconocida eficiencia como productores de Xilitol. Pueden aislarse a partir de diversas fuentes biológicas, como residuos agrícolas, subproductos industriales y materiales vegetales, lo que ofrece una amplia diversidad genética y metabólica [9]. Los principales géneros de levaduras reportadas como productoras de Xilitol son: *Candida*, *Kluyveromyces*, *Pichia* y *Pachysolen* [10].

Diversos estudios han demostrado que materiales vegetales como cortezas, frutas, residuos de caña y subproductos lignocelulósicos constituyen reservorios naturales de levaduras capaces de metabolizar pentosas y producir Xilitol. Estos sustratos contienen azúcares disponibles y fracciones hemicelulósicas que favorecen la selección de microorganismos con rutas metabólicas adaptadas a la xilosa. Por ello, la elección de bagazo y jugo de caña, ciruela, corteza de árbol y cáscara de coco en este estudio se sus-

tenta en su disponibilidad regional, su composición rica en carbohidratos y la evidencia previa de aislamientos exitosos de levaduras con potencial biotecnológico en matrices vegetales similares.

Kusumawati et al. [11] aislaron seis cepas capaces de consumir xilosa, de las cuales tres produjeron entre 5 y 6 g/L a las 72 h de la fermentación. Estas cepas fueron identificadas como *Pichia kudriavzevii* SL1(1), *Pichia kudriavzevii* R5 y *Candida xylopsi* SL6, capaces de crecer en hidrolizados de residuos de troncos de palma aceitera. Por su parte, Delfin-Ruiz et al. [12] evaluaron la producción de Xilitol por la levadura *Candida tropicalis* IEC 5-ITV empleando xilosa proveniente del hidrolizado ácido de bagazo de caña obteniendo 5.5 g/L al final de la fermentación. Pant et al. [13] reportaron la producción de Xilitol utilizando la levadura *Candida sojae* JCM 1644 alcanzando un rendimiento de 0.62 g/g.

En este contexto, el aislamiento, selección y caracterización de cepas de levaduras productoras de Xilitol a partir de diversas fuentes biológicas, como bagazo de caña, jugo de caña, ciruela, corteza de árbol y cáscara de coco, ofrecen nuevas oportunidades para mejorar el rendimiento y la productividad del proceso. El uso de microorganismos autóctonos puede incrementar la eficiencia de los procesos biotecnológicos, debido a su adaptación a las condiciones climáticas y a las materias primas de la región [14].

Por lo tanto, el presente trabajo tuvo como objetivo aislar, seleccionar y caracterizar cepas de levaduras a partir de diversas fuentes de materias tales como residuos lignocelulósicos, frutas y jugos de caña de azúcar, las cuales sean capaces de metabolizar la xilosa sintética y la presente en el hidrolizado ácido proveniente de la hemicelulosa de los residuos lignocelulósicos (bagazo de caña de azúcar). Esto con el fin de lograr obtener un proceso eficiente para la producción de Xilitol por vía biotecnológica, beneficiando al sector agroalimentario y el rescate del campo mexicano, mediante el aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos para la producción de un producto de alto valor agregado como es el Xilitol.

MATERIAL Y MÉTODOS

Aislamiento de levaduras

Las fuentes biológicas utilizadas para el aislamiento de levaduras fueron residuos y materiales vegetales obtenidos de zonas agrícolas del estado de Veracruz, México: bagazo de caña de azúcar quemado y sin quemar, jugo de caña, jugo de ciruela roja, cáscara de coco y corteza de árbol. Estos materiales se seleccionaron por su origen vegetal, su contenido de azúcares solubles y polisacáridos estructurales, así como por su exposición ambiental, condiciones que favorecen la presencia de microbiota nativa asociada, incluyendo levaduras fermentativas.

Las muestras sólidas (bagazo, cáscara de coco y corteza de árbol) se recolectaron frescas, se colocaron en recipientes estériles y se transportaron al laboratorio para su procesamiento dentro de las primeras 24 h. Previo al aislamiento, se sometieron a un pretratamiento físico consistente en reducción de tamaño y homogeneización manual. Posteriormente, se pesó 1 g de muestra y se suspendió directamente en el medio de enriquecimiento. En el caso de las muestras líquidas (jugo de caña y jugo de ciruela), se homogenizaron y se tomaron alícuotas de 1 mL para inoculación directa. No se aplicaron tratamientos químicos ni térmicos previos, con el fin de conservar la microbiota nativa presente en cada sustrato.

El aislamiento de las levaduras se realizó con base en la metodología reportada por Diaz-Nava [15], empleando xilosa como fuente de carbono. Se utilizó un medio de cultivo con la siguiente composición (g/L): xilosa 30, KH_2PO_4 5.0, $(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{O}$, extracto de levadura 1.0 y Urea 3.0. El pH se ajustó a 5.5 y el medio se esterilizó durante 15 minutos a 121 °C. Se inocularon 1 g o 1 mL de cada muestra en matraces con 50 mL de medio y se incubaron durante 36 h, 30 °C y 250 rpm. Para ello se tomaron 1 mL o 1 g de las materias primas seleccionadas: 1) corteza de árbol, 2) ciruela roja, 3) cascara de coco, 4) bagazo de caña de azúcar quemado, 5) jugo de caña de azúcar y 6) bagazo de caña de azúcar sin quemar. Este volumen fue adicionado a los matraces que contenían 50 mL de medio de cultivo. Posteriormente se incubaron por 36 horas a 30 °C y 250 rpm.

Para la obtención del cultivo puro, se prepararon 5 diluciones con agua destilada estéril (10-1, 10-2, 10-3, 10-4, 10-5), y se adicionó 1 mL de cada dilución en cajas Petri conteniendo: agar 20 g/L, xilosa 20 g/L y extracto de levadura 10 g/L. Se incubaron las cajas Petri por 2-3 días a 30 °C. Posteriormente las colonias crecidas se seleccionaron y sembraron en cajas Petri nuevamente, para separar cada microorganismo y así obtener los cultivos puros, los cuales se incubaron durante dos a tres días, a 30 °C.

Selección primaria

Para la selección primaria, se realizó una cinética para cada una de las colonias obtenida durante 72 h, en la cual se utilizó un medio de activación con componentes de xilosa 30 g/L, KH_2PO_4 5.0 g/L, $(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{O}$ 0.4 g/L, Extracto de levadura 1.0 g/L y Urea 3.0 g/L; esta se utilizó para identificar qué cepas sintetizan el Xilitol [15].

Para la producción de Xilitol, se prepararon los medios de activación y se añadieron 30 mL a matraces de 50 mL; posteriormente se esterilizaron en la autoclave durante 15 min a 121 °C. Una vez enfriados, se inocularon con 3 azadas de las cepas aisladas

y se incubaron durante 72 h a 30 °C y 250 rpm. Se tomaron muestras diarias durante 4 días, cada 24 h, en Eppendorf y se prepararon para su análisis por HPLC para cuantificar la producción de Xilitol.

Determinación analítica

Las muestras obtenidas previamente fueron centrifugadas, y el sobrenadante fue analizado para medir la concentración de Xilitol y de xilosa, por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC), usando una columna Aminex HPX-87H Biorad, con una fase móvil con una solución de H_2SO_4 al 0.5 % (v/v), con un flujo de 0.6 mL/min, durante 30 minutos, usando un horno con una columna a 50 °C y un detector de índice de refracción (RID) marca Shimadzu, se realizó la curva de calibración previamente con Xilitol marca Sigma, como estándar a concentraciones de 1 a 50 g/L.

RESULTADOS

Aislamiento y selección: De las diferentes fuentes que fueron recolectadas como muestras de campos agrícolas donde se consideraba la presencia de levaduras se consideraron las siguientes: 1) corteza de árbol, 2) ciruela roja, 3) cascara de coco, 4) bagazo de caña de azúcar quemado, 5) jugo de caña de azúcar y 6) bagazo de caña de azúcar sin quemar, La Figura 1 muestra las diferentes fuentes vegetales inoculadas en el medio de cultivo líquido.



Figura 1. Muestras vegetales inoculadas en el medio líquido conteniendo xilosa como fuente de carbono.

Fuente: Elaboración propia.

Se aislaron 69 cepas en total, considerando todas las diferentes fuentes de aislamiento. De acuerdo a la fuente se lograron aislar 6 cepas de ciruela roja (CRC), 11 de cáscara de coco (CoC), 9 de bagazo de caña sin quemar (BSQC), 14 de jugo de caña quemado (JQC), 20 de jugo de caña sin quemar (JSQC), y 9 de corteza de árbol (CC).

La primera selección consistió en realizar una primera fermentación en medio sintético, al término de 72 h se tomó muestras y aquellas cepas capaces de producir Xilitol fueron seleccionadas, en la (Figura

ra 2) se muestran algunas cepas capaces de producir Xilitol.

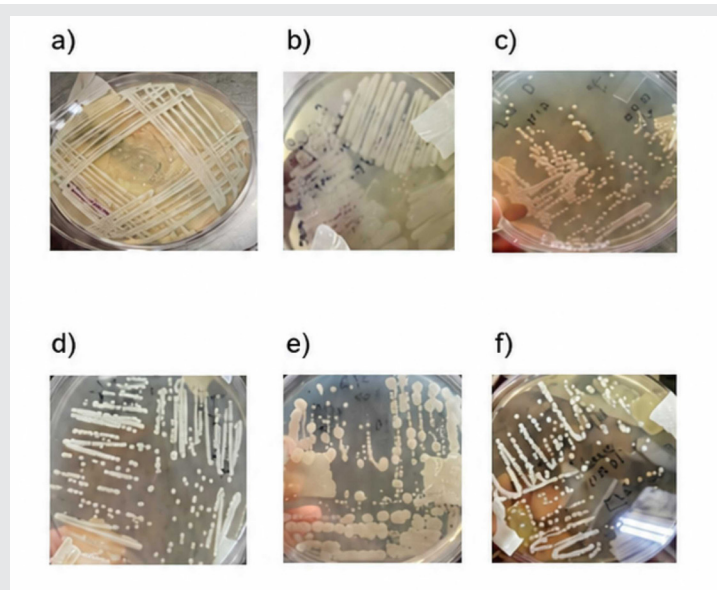


Figura 2. Cepas aisladas en medio solido de agar usando xilosa como fuente de carbono provenientes de: 1) Corteza de árbol (CC), 2) Ciruela roja (CRC), 3) Cascara de coco (CoC), 4) Bagazo de caña de azúcar quemado (BQC), 5) Jugo de caña de azúcar sin quemar (JSQC), 6) Bagazo de caña de azúcar sin quemar (BSQC).

Fuente: Elaboración propia.

De las 69 cepas aisladas, se seleccionaron 14 que demostraron una buena producción y productividad de Xilitol (Tabla 1).

Las cepas aisladas de ciruela roja (CRC1, CRC2) alcanzaron a producir de 1.54 hasta 2.99 g/L de Xilitol a las 24 h (CRC2), mientras que las cepas provenientes de coco (CoC5, CoC 6 y CoC 7) alcanzaron la mayor producción de Xilitol obteniendo hasta 9.48 g/L a las 72 h (CoC6). Las cepas provenientes de la corteza de árbol (CC1.1, CC2, CC4, CC5, CC6) alcanzaron la mayor producción de Xilitol en comparación de todas las demás (ciruela, coco, bagazo quemado y sin quemar, jugo quemado y sin quemar, ciruela amarilla) obteniendo 11.89 g/L de Xilitol a las 72 h con la cepa CC2.

Para bagazo quemado (BQC3.1), bagazo sin quemar (BSQC1), jugo quemado (JQC 1.4) y jugo sin quemar (JSQC1) las concentraciones fueron muy similares entre ellas, tomando valores entre 0.6 y 2.1 g/L mostrando presencia de Xilitol entre las 48 y 72 h.

Trichez et al. [16] aislaron de residuos de madera dos cepas de levaduras JA1 y JA9 capaces de metabolizar la xilosa y producir Xilitol, alcanzando productividades cercanas a 0.2 g/Lh. Junyapate et al. [17] reportaron una nueva cepa productora de Xilitol del género Yamadazyma (Tabla 2), sin embargo, la productividad reportada para esta cepa fue baja (0.019 g/Lh).

Tabla 1. Cepas aisladas y seleccionadas con potencial en la producción de Xilitol.

Clave de la cepa	Sustrato fuente	Xilitol (g/L)	Qp (g/Lh)
CRC1	Ciruela roja	1.54	0.021
CRC2	Ciruela roja	2.99	0.125
CoC5	Coco	8.9	0.124
CoC6	Coco	6.19	0.085
CoC7	Coco	3.35	0.046
CC 1.1	Corteza de árbol	7.4	0.102
CC2	Corteza de árbol	11.8	0.164
CC4	Corteza de árbol	7.08	0.098
CC5	Corteza de árbol	11.39	0.160
CC6	Corteza de árbol	6.19	0.085
BQC 3.1	Bagazo de caña quemado	2.36	0.05
BSQC1	Bagazo de caña sin quemar	2.43	0.05
JQC 1.4	Jugo de caña quemado	2.19	0.045
JSQC1	Jugo de caña sin quemar	1.13	0.023

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Comparación de levaduras aisladas para la producción de Xilitol.

Cepa o microorganismo	Sustrato fuente	Qp (g/Lh)	Referencia
<i>Spathaspora sp. JA1</i>	Madera en descomposición	0.20	Trichez et al. [16]
<i>Meyerozyma caribbica JA9</i>	Madera en descomposición	0.10	Trichez et al. [16]
<i>Yamadazyma ubonensis</i>	Corteza de árbol	0.019	Junyapate et al. [17]
CC2	Corteza de árbol	0.164	Este trabajo
CC5	Corteza de árbol	0.160	Este trabajo

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3, se muestra la cinética de producción de Xilitol por la levadura aislada de la corteza de ciruela CC2. A las 72 h se alcanzó a obtener 11.8 g/L de Xilitol, con un rendimiento Yp/s de 0.48 g/g, una eficiencia del 52.7 % y una productividad Qp de 0.16 g/L.h.

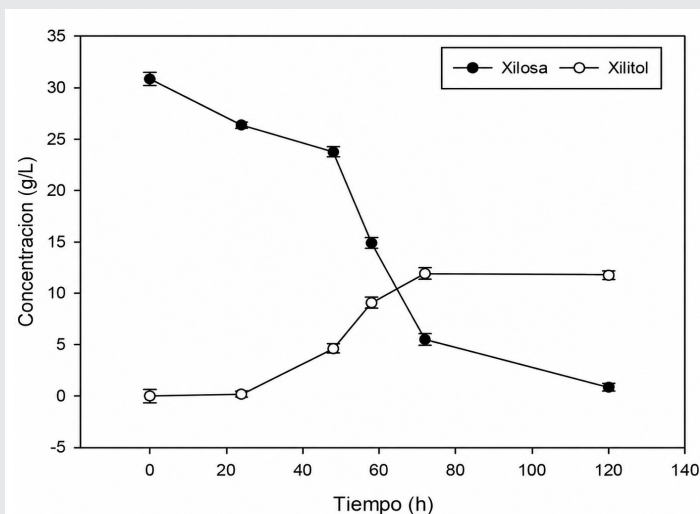


Figura 3. Cinética de producción de Xilitol de la levadura aislada de la corteza de ciruela CC2.

Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones de producción y composición del medio de cultivo de las cepas reportadas no han sido optimizadas, por lo tanto, estas cepas muestran un gran potencial para aplicarse en la producción de Xilitol por vía biotecnológica optimizando el proceso para su aplicación en el aprovechamiento de la xilosa proveniente de residuos lignocelulósicos.

CONCLUSIONES

De las 69 cepas aisladas de residuos lignocelulósicos, 14 de estas son capaces de producir Xilitol entre las 24 y 72 h, siendo dos cepas provenientes de la corteza de árbol (CC2 y CC5) las que alcanzaron la mayor concentración de Xilitol y productividad, en un medio suplementado con xilosa sin optimizar su composición y condiciones fisicoquímicas de fermentación. Por lo que estas cepas muestran un potencial favorable para su aplicación en el proceso biotecnológico de producción de Xilitol, usando xilosa proveniente de los residuos lignocelulósicos, apoyando al sector agroalimentario y el campo mexicano.

AGRADECIMIENTOS

Al COVEICYDET por el apoyo financiero otorgado al proyecto "Producción de bioetanol bajo un concepto de biorrefinería # CP 1111 1611/2023, así como por la beca asignada a la estudiante de Licenciatura en Ingeniería Bioquímica Tyana Betsaida Aguilar Pastelin.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Kumar, K., Singh, E., Shrivastava, S. (2022). Microbial xylitol production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(3), 971-979.

[2] Awuchi, C. G., and Echeta, K. C. (2019). Current developments in sugar alcohols: Chemistry, nutrition, and health concerns of sorbitol, xylitol,

glycerol, arabitol, inositol, maltitol, and lactitol. *Int J Adv Acad Res*, 5(11), 1-33.

[3] Dwivedi, R. S. (2022). Saccharide Sweet (SS) Principles, Classification and Structural and Functional Details of SS Sweeteners and Plants. In *Alternative Sweet and Supersweet Principles: Natural Sweeteners and Plants* (pp. 113-223). Singapore: Springer Nature Singapore.

[4] Infanzón-Rodríguez, M.I. (2013). Producción de Xilitol en Cultivo por Lote Alimentado a partir de Hidrolizado de Bagazo de Sorgo Dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) con *Candida tropicalis* IEC5-ITV. Tesis maestría. Unidad de investigación y desarrollo en alimentos, Veracruz, Ver.

[5] Kang, T. Z., et al. (2016). Fermentative production of xylitol: A first Trial on xylose bifurcation. *Indian Journal of science and Technology* 9.

[6] Silva, T. P., de Assis, G. C., Santana, N. B., de Carvalho Tavares, I. M., Santos, P. H., Salay, L. C., Franco, M. (2023). Conversion of lignocellulosic biomass to xylitol and its applications. In *Valorization of Biomass to Bioproducts* (pp. 1-26). Elsevier.

[7] Arcaño, Y. D., García, O. D. V., Mandelli, D., Carvalho, W. A., Pontes, L. A. M. (2020). Xylitol: A review on the progress and challenges of its production by chemical route. *Catalysis Today*, 344, 2-14.

[8] Jain, V., and Ghosh, S. (2023). Biotransformation of lignocellulosic biomass to xylitol: an overview. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(11), 9643-9661.

[9] Queiroz, S. D. S., Jofre, F. M., Bianchini, I. D. A., Boaes, T. D. S., Bordini, F. W., Chandel, A. K., Felipe, M. D. G. D. A. (2023). Current advances in *Candida tropicalis*: Yeast overview and biotechnological applications. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 70(6), 2069-2087.

[10] Serpa, J. D. F., dos Santos, F. D., Soares, C. E. A., Pessela, B. C., and Rocha, M. V. P. (2025). Sustainable Bioconversion of Cashew Apple Bagasse Hemicellulosic Hydrolysate into Xylose Reductase and Xylitol by *Candida tropicalis* ATCC 750: Impact of Aeration and Fluid Dynamics. *Applied Microbiology*, 5(3), 75.

[11] Kusumawati, N., Sumarlan, S. H., Zubaidah, E., Wardani, A. K. (2023). Isolation of xylose-utilizing yeasts from oil palm waste for xylitol and ethanol production. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), 71.

[12] Delfín-Ruíz, M. E., Aguilar-Uscanga, M. G., Gómez-Rodríguez, J. (2023). Xylitol Production by *Candida tropicalis* IEC5-ITV using sugarcane bagasse acid pretreated. *Sugar Tech*, 25(5), 1231-1240.

[13] Pant, S., Prakash, A., Kuila, A. (2022). Integrated production of ethanol and xylitol from *Brassica juncea* using *Candida sojae* JCM 1644. *Bioresource Technology*, 351, 126903.

[14] Díaz Nava, Libia Elena. (2014). Aislamiento y selección de levaduras para la producción de etanol durante la fermentación espontánea de jugo de sorgo dulce.

[15] Díaz Nava, Libia Elena. (2018). Caracterización metabólica y cinética de la levadura autóctona *Pichia kudriavzevii* ITV-S42.

[16] Trichez, D., Steindorff, A. S., Soares, C. E., Formighieri, E. F., Almeida, J. R. (2019). Physiological and comparative genomic analysis of new isolated yeasts *Spathaspora* sp. JA1 and *Meyerozyma caribbica* JA9 reveal insights into xylitol production. *FEMS yeast research*, 19(4), foz034.

[17] Junyapate, K., Jindamorakot, S., Limtong, S. (2014). *Yamadazyma ubonensis* fa, sp. nov., a novel xylitol-producing yeast species isolated in Thailand. *Antonie*





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Análisis Experimental de la carga de una batería tipo LiFePO₄



Colaboración

Fernando Jurado Pérez; Erick A. González Barbosa; Rafael A. Rodríguez Moreno; José J. Vázquez Martínez; Nicolás Ortega Miranda, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Fecha de recepción: 07 de mayo de 2025

Fecha de aceptación: 02 de junio de 2026

Autor de Correspondencia: Fernando Jurado Pérez

RESUMEN: Las baterías de Ion-Litio están ocupando un lugar cada vez más preponderante en la sociedad actual, desde dispositivos electrónicos portátiles, hasta en sistemas de almacenamiento de energía masiva como vehículos de dos, tres y cuatro ruedas. Cabe mencionar que este tipo de baterías se degrada bajo condiciones dinámicas de carga y descarga. El presente trabajo presenta tres procesos de carga de una batería del tipo LiFePO₄ en la cual se analiza la transferencia desde el cargador hasta la batería. Se utilizaron, un cargador de baterías comercial, un arreglo resistivo serie paralelo de resistencias, un Arduino a manera de convertidor analógico-digital para la transferencia de información, y para la adquisición y procesamiento de datos, el programa Python.

PALABRAS CLAVE: Baterías, Ion-Litio, Transferencia, Carga, Análisis Numérico.

ABSTRACT: Lithium-ion batteries are taking an increasingly prominent role in today's society, from portable electronic devices to large-scale energy storage systems for two-, three-, and four-wheel vehicles. It is worth mentioning that this type of battery degrades under dynamic charge and discharge conditions. This work presents three charging cycles of a LiFePO₄-type battery, in which the transfer of charge from the charger to the battery is analyzed. A commercial battery charger was used, along with a series-parallel resistive array to monitor current and voltage transfer. An Arduino was used as an analog-to-digital converter for data transfer, and Python was employed for data acquisition and processing.

KEYWORDS: Batteries, Lithium-Ion, Transfer, Charging, Numerical Analysis.

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica desempeña un papel fundamental en nuestra vida diaria, pues constituye la base de innumerables aplicaciones tecnológicas y domésticas. Su versatilidad radica en la facilidad con la que puede transformarse en energía luminosa, térmica o mecánica. Sin embargo, uno de

los principales desafíos asociados a su uso es la dificultad de almacenarla de manera eficiente y segura. En general, el almacenamiento de energía eléctrica requiere su conversión en otras formas de energía, siendo las baterías electroquímicas uno de los medios más extendidos y efectivos para este propósito.

En las baterías, la energía se almacena en los enlaces químicos de los compuestos activos, liberándose durante la descarga mediante reacciones electroquímicas que generan corriente eléctrica a un voltaje determinado. En el caso de las baterías recargables, este proceso es reversible, lo que permite múltiples ciclos de carga y descarga. Entre las tecnologías más relevantes en la actualidad se encuentran las baterías de ion-litio, que han revolucionado el campo del almacenamiento energético gracias a su alta densidad de energía, larga vida útil y eficiencia en la conversión.

Dentro de esta familia, las baterías de fosfato de hierro-litio (LiFePO_4) destacan por su estabilidad térmica y química, su bajo riesgo de combustión en comparación con otros compuestos de litio, y su capacidad para mantener un voltaje relativamente constante durante la descarga. Estas características las convierten en una opción preferente para aplicaciones que requieren seguridad, durabilidad y rendimiento sostenido, como sistemas de respaldo energético, movilidad eléctrica y almacenamiento en redes inteligentes.

El análisis de las baterías LiFePO_4 desde el punto de vista eléctrico resulta esencial para comprender cómo varían parámetros críticos como la corriente de carga y el voltaje en función del tiempo y las condiciones de operación. Dicho estudio no solo permite optimizar su desempeño, sino también establecer modelos predictivos que faciliten su integración en sistemas de mayor escala. En el presente documento se examinan las características de carga de una batería LiFePO_4 , considerando el comportamiento de la corriente suministrada y la evolución del voltaje durante el proceso, con el fin de aportar una visión técnica que contribuya al entendimiento y aplicación de esta tecnología en escenarios prácticos y académicos. [1] Kiehne (2003).

MATERIAL Y MÉTODOS

La batería utilizada en este experimento corresponde a una celda recargable de característica reversible, cuya composición química es fosfato de hierro-litio (LiFePO_4), marca Howell Energy, con especificaciones nominales de 12 V y 9 Ah (Imagen 1(c)). Este tipo de batería se seleccionó debido a su estabilidad térmica, seguridad frente a sobrecargas y capacidad de mantener un voltaje relativamente constante durante el proceso de descarga, lo que la convierte en un modelo adecuado para estudios de comportamiento eléctrico.

Para la caracterización experimental, se diseñó un arreglo de resistencias conectado directamente a los terminales de la batería. Dicho arreglo consistió en tres resistencias de $1\text{ M}\Omega$ a $\frac{1}{4}\text{ W}$ en serie y cinco resistencias de $1\ \Omega$ a 1 W en paralelo, configuradas de acuerdo con lo mostrado en la Imagen 1(b). Esta disposición permitió establecer condiciones controladas de carga y descarga, asegurando una disipación adecuada de energía y un comportamiento reproducible en las mediciones.

El monitoreo de los parámetros eléctricos se realizó mediante una tarjeta de adquisición Arduino UNO (Imagen 1(d)), la cual se empleó para registrar tanto el voltaje como la corriente suministrada a la batería. Para ello, el arreglo de resistencias se conectó a las entradas analógicas A0 y A1, garantizando una lectura continua y precisa de las variables de interés. El suministro de energía eléctrica se efectuó utilizando un cargador de 12 V y 1400 mA marca Steren Figura 1, seleccionado por su compatibilidad con las especificaciones de la batería y su capacidad de mantener un flujo constante de corriente durante el proceso de carga.

La adquisición de datos se llevó a cabo mediante una interfaz Arduino-PYTHON Figura 1, lo que permitió integrar la captura de señales con herramientas de análisis numérico y visualización. El muestreo de la señal se realizó con un periodo de 0.3 segundos, durante un intervalo total de 2.3 horas, lo que proporcionó una resolución temporal suficiente para observar la evolución del voltaje y la corriente en función del tiempo. Esta metodología asegura la obtención de datos confiables y facilita la posterior validación de modelos matemáticos que describen el comportamiento dinámico de las baterías LiFePO_4 .

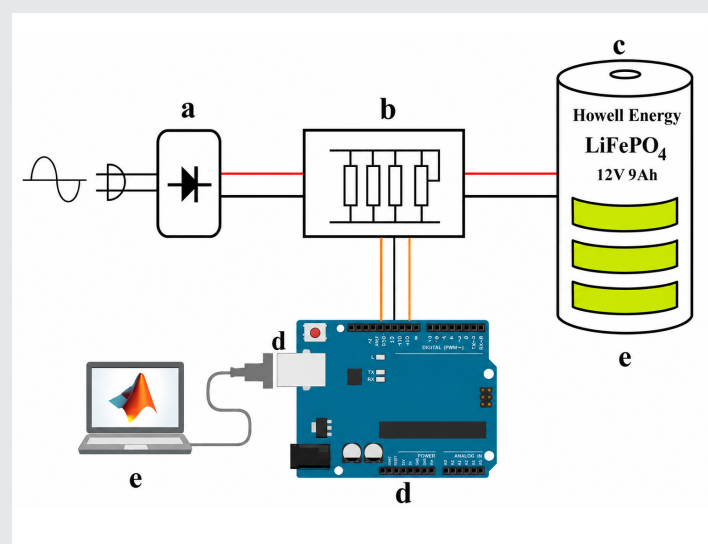


Figura 1. Conexión del circuito de monitoreo.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Desarrollo experimental

El experimento se llevó a cabo partiendo de una condición inicial en la que la batería LiFePO₄ presentaba únicamente la carga mínima recomendada por el fabricante, con el fin de observar el comportamiento eléctrico desde un estado de baja energía. Se procedió a conectar el circuito de carga según el esquema mostrado en la Imagen 1, asegurando la correcta disposición de los componentes: el cargador de 12 V a 1400 mA, el arreglo de resistencias, la batería Howell Energy de 12 V y 9 Ah, el microcontrolador Arduino UNO y la interfaz de adquisición PYTHON.

Antes de iniciar la adquisición de datos, se verificó que el sistema de medición fuera capaz de censar correctamente los parámetros eléctricos requeridos, en particular el voltaje en los terminales de la batería y la corriente suministrada durante el proceso de carga. Esta validación incluyó la comprobación de las señales en las entradas analógicas A0 y A1 del Arduino, así como la sincronización de la comunicación con PYTHON.

La transferencia de carga fue monitoreada mediante la lectura de los valores eléctricos en el arreglo de resistencias, utilizando el Arduino como sistema de adquisición. Los datos fueron capturados en tiempo real por medio de la interfaz Arduino-PYTHON, lo que permitió una integración eficiente entre el hardware de medición y el entorno de análisis.

Los datos obtenidos se almacenaron en un archivo de texto (.txt), estructurado en dos columnas: la primera correspondiente al voltaje medido en la batería, y la segunda a la corriente registrada en el circuito de carga. Esta organización facilita el análisis posterior, permitiendo la representación gráfica de las variables, la identificación de patrones de comportamiento y la validación de modelos matemáticos. La Tabla 1 presenta un extracto representativo de los datos adquiridos durante el experimento. En la Figura 2 se puede apreciar el análisis de la corriente vs el tiempo, este análisis se realizó con un algoritmo en el lenguaje de Python. Mediante el ejemplo de simulación previo la Figura 3 muestra el voltaje vs tiempo.

Tabla 1. Analisis de prueba de carga V vs I.

Voltaje	Corriente
11.5630067	4.461270751
13.33370496	0
14.32676283	0
10.89592552	2.733495374
11.12005027	3.86815383
13.72334923	0
10.74076202	0
13.67162802	3.558701524
11.08556979	1.573044924
11.58554106	0.28356919

Fuente: Elaboración propia.

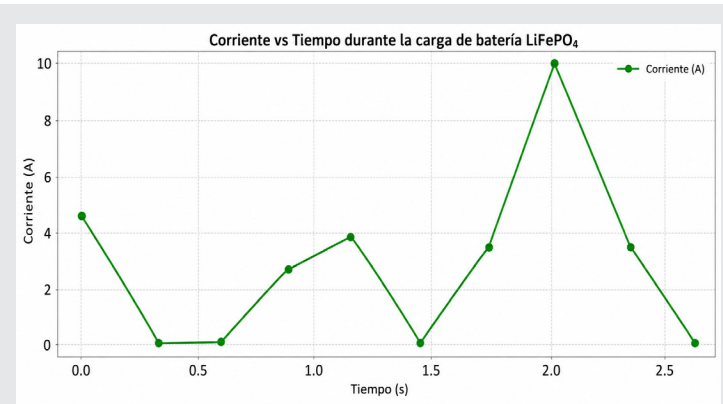


Figura 2. Visualización de a corriente vs tiempo de carga.

Fuente: elaboración propia.

Algoritmo 1. Simulación del programa en el ambiente de programación Python.

```
# Generating analysis of LiFePO4 battery charge data with plots and energy calculation
```

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import os
```

```
# Ensure output directory exists
output_dir = "/mnt/data"
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)
```

```
# Datos de voltaje (V) y corriente (I)
voltaje = np.array([13.56830067, 13.53370496, 13.3270898,
10.89595225, 13.72334923,
13.74076202, 13.74687027, 11.58554106, 13.7263036,
13.75783001])
corriente = np.array([4.461270751, 0, 0, 2.733495374,
3.86815382,
0, 3.558701524, 9.928356991, 3.50712641, 0])
```

```
# Tiempo en segundos (muestreo cada 0.3 segundos)
tiempo = np.arange(0, len(voltaje) * 0.3, 0.3)
```

```
# Gráfica de voltaje vs tiempo
```

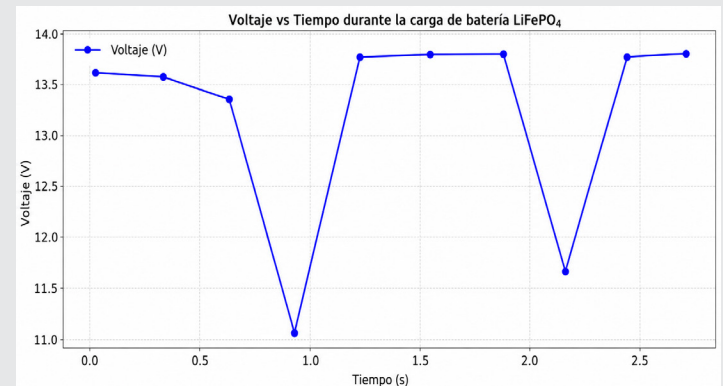


Figura 3. Visualización de a corriente vs tiempo de carga.

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de análisis y a través de la implementación y de uso de otro software como el MATLAB, y con el uso de los datos de la columna de voltaje se grafican las líneas medidas en tiempo real como es viable observar en la Figura 4, el experimento se repite en tres ocasiones (líneas azul, roja y verde), como se pueden ver en las tres mediciones en concordancia con [2] Søren (2023).

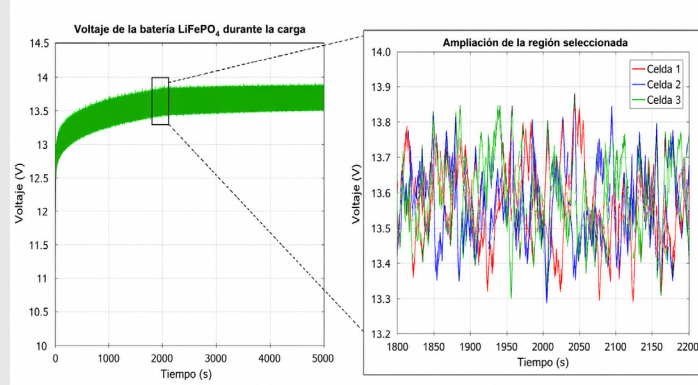


Figura 4 Gráficas de la medición del voltaje en tiempo real.

Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera como se hizo con los datos reales de corriente, se procedió a realizar las gráficas con los datos reales obtenidos del experimento, se hicieron tres mediciones, medición 1 (en azul), medición 2 (en rojo) y medición 3 (en verde), En la Figura 5 se observa esta experimentación

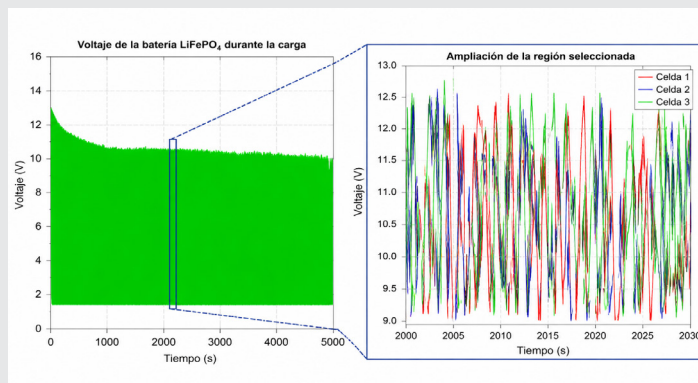


Figura 5. Gráficas de la medición de corriente en tiempo real.

Fuente: Elaboración propia.

Para un mejor entendimiento de los valores medidos, se procedió a calcular las líneas de tendencia con el programa, las líneas se calcularon en el rango de medición a una sexta potencia y los resultados de estas líneas de tendencia se muestran en las Figuras 5, 6. En concordancia con [2] Søren (2023).

La transferencia de carga (i en amperes [A], t en segundos [s] y q en coulombs [C]) fue calculada a partir de la Ecuación 1.

$$q = \int_0^t i(t) dt \quad \text{Ec. (1)}$$

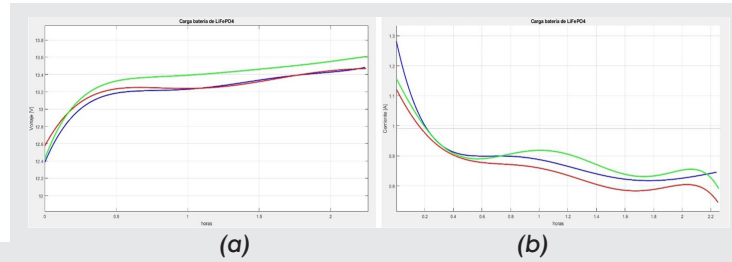


Figura 6. Líneas de tendencia del Voltaje (a) y la corriente (b).

Fuente: Elaboración propia.

Por lo que el área bajo la curva de las líneas de corriente son las siguientes; medición 1 (línea azul) $2.3583e+04$ C, medición 2 (línea roja) $2.3121e+04$ C y la medición 3 (línea verde) $2.3508e+04$, Con estos resultados tenemos una diferencia de medición de alrededor del 1.3 % en promedio.

Suponiendo que el sensor entrega una señal analógica proporcional a la corriente y usa un Arduino para digitalizarla.

```
import random
import time
```

```
def leer_datos_bms_simulado():
    # Simulación de valores realistas
    voltaje = round(random.uniform(11.5, 13.0), 2) # Voltaje
    corriente = round(random.uniform(0.5, 2.0), 2) # Corriente
    temperatura = round(random.uniform(25.0, 40.0), 1)
    # Temperatura en °C
    return voltaje, corriente, temperatura
```

```
# Simulación de lectura continua
for _ in range(10): # Puedes cambiar el rango para más lecturas
    v, i, t = leer_datos_bms_simulado()
    print(f"Voltaje: {v:.2f} V, Corriente: {i:.2f} A, Temp: {t:.1f} °C")
    time.sleep(1)
```

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que el método propuesto para la monitorización de la carga en tiempo real de baterías LiFePO₄, es técnicamente viable y ofrece una resolución suficiente para caracterizar el comportamiento eléctrico durante el proceso de carga. A pesar de presentar ligeras variaciones en los datos adquiridos, estas se mantienen dentro de márgenes estadísticamente aceptables para experimentos de laboratorio, lo que valida la funcionalidad del sistema de adquisición basado en Arduino, Matlab y Python.

La estructura de datos obtenida, junto con la visualización de las curvas de voltaje y corriente, permite identificar patrones relevantes en la transferencia de energía, lo que constituye una base sólida para el desarrollo de modelos predictivos y estrategias de control en sistemas de almacenamiento energético.

Como línea de investigación futura, se propone enfocar los esfuerzos en el monitoreo del envejecimiento

de las baterías, particularmente en la evolución de la capacidad de carga a lo largo de múltiples ciclos de operación. Este aspecto es crucial para evaluar la durabilidad y eficiencia de las baterías en aplicaciones reales, y para establecer criterios de reemplazo o mantenimiento preventivo.

Asimismo, se recomienda incrementar la frecuencia de muestreo en experimentos posteriores, con el fin de mejorar la resolución temporal de los datos y minimizar la posibilidad de omitir eventos transitorios significativos. Esta mejora permitiría reducir el margen de error entre mediciones consecutivas y fortalecer la precisión de los análisis eléctricos.

En conjunto, el sistema desarrollado constituye una herramienta accesible y adaptable para estudios experimentales sobre baterías LiFePO_4 , y abre la puerta a investigaciones más profundas sobre su comportamiento dinámico, eficiencia energética y degradación a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Kiehne H. A. (2003) *Battery Technology Handbook*, Marcel Decker Inc.

[2] Søren B. Vilsen et. al. (2023), *Dataset of lithium-ion battery degradation based on a forklift mission profile for state-of-health estimation and lifetime prediction*, *Data in Brief* (52) 109861, pg 1-8, doi.org/10.1016/j.dib.2023.109861.

[3] D.-I. Stroe, M. Swierczyński, A.-I. Stan, R. Teodorescu, S.J. Andreasen, *Accelerated lifetime testing methodology for lifetime estimation of lithium-ion batteries used in augmented wind power plants*, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 50 (6) (2014) 4006-4017, doi:10.1109/TIA.2014.2321028.

[4] D.-I. Stroe, M. Swierczynski, A.-I. Stroe, S. Knudsen Kær, *Generalized characterization methodology for performance modelling of lithium-ion batteries*, *Batteries* 2 (4) (2016) 37, doi:10.3390/batteries2040037.

[5] S.B. Vilsen, D.-I. Stroe, *Transfer learning for adapting battery state-of-health estimation from laboratory to field operation*, *IEEE Access* 10 (2022) 26514-26528, doi:10.1109/ACCESS.2022.3156657.





Mecánica *de* Materiales

Ingeniantes

Comportamiento tribológico de un acero 4140 nitrocarburoizado ferrítico por sales

RESUMEN: Este trabajo investiga el efecto de la nitrocarburoización en baño de sales y un subsecuente postratamiento, sobre el comportamiento tribológico del acero AISI 4140 sometido a los procesos Tenifer y Tenifer-QPQ. Para esto, el desempeño es comparado, bajo una condición tribológica fija, con la referencia del acero base sin tratamiento. Las muestras fueron expuestas al tratamiento de nitrocarburoizado a 580 °C durante 90 min.

La metalografía reveló una capa de compuestos (capa blanca) de $10.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ para Tenifer y $13.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ para Tenifer-QPQ, con zonas de difusión de $250 \pm 20 \mu\text{m}$ y $280 \pm 20 \mu\text{m}$, respectivamente.

Los perfiles de microdureza Vickers indicaron durezas superficiales de $\sim 780 H_{V0.01}$ (Tenifer) y $\sim 1021 H_{V0.01}$ (Tenifer-QPQ), con disminución gradual hacia el núcleo.

La difracción de rayos X confirmó la presencia de las fases $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ y $\gamma\text{'-Fe}_4\text{N}$, además de Fe_3O_4 en el proceso Tenifer-QPQ.

La resistencia al desgaste se evaluó mediante ensayos de perno sobre disco bajo la norma ASTM G99, usando una esfera de alúmina de 5 mm de diámetro y una carga de 5 N, durante 250 m a 0.15 m/s.

El coeficiente de fricción fue 0.492 (acero referencia), 0.775 (Tenifer) y 0.378 (Tenifer-QPQ). Mientras que el volumen perdido en cada muestra fue 0.1045, 0.0999 y 0.0294 mm^3 , respectivamente.

Bajo las condiciones experimentales empleadas, la condición Tenifer-QPQ presentó el mayor incremento en resistencia al desgaste.

PALABRAS CLAVE: AISI 4140; coeficiente de fricción; volumen perdido; nitrocarburoizado ferrítico; Tenifer; Tenifer-QPQ.



Colaboración

Virgilio Alberto Aquino Cruz; Roberto Carlos Vega Morón, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepanlla; Angel Manuel Delgado Brito, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán; Lizbeth Melo Máximo; José Solís Romero, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepanlla

Fecha de recepción: 11 de febrero de 2026

Fecha de aceptación: 26 de mayo de 2026

Autor de Correspondencia: Roberto Carlos Vega Morón

ABSTRACT: This work investigates the effect of salt-bath nitrocarburoizing and a subsequent post-treatment on the tribological behavior of AISI 4140 steel subjected to Tenifer and Tenifer-QPQ processes. The results were compared with the reference untreated substrate steel under a fixed tribological condition. The thermochemical treatments were conducted at 580 °C for 90 min.

The metallographic process revealed a compound (white) layer thickness of $10.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ for Tenifer and $13.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ for Tenifer-QPQ, with diffusion zones of $250 \pm 20 \mu\text{m}$ and $280 \pm 20 \mu\text{m}$, respectively. Cross-sectional Vickers microhardness profiles indicated surface hardness values of $\sim 780 H_{V0.01}$ (Tenifer) and $\sim 1021 H_{V0.01}$ (Tenifer-QPQ), decreasing gradually toward the core.

The X-ray diffraction tests identified the presence of $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ and $\gamma\text{'-Fe}_4\text{N}$, as well as Fe_3O_4 for Tenifer-QPQ.

The wear resistance was evaluated by dry pin-on-disk tests according to ASTM G99 standard, using a 5 mm alumina ball, with a normal load of 5 N, a sliding distance of 250 m, and a sliding speed of 0.15 m/s. The friction coefficient was 0.492 (reference), 0.775 (Tenifer), and 0.378 (Tenifer-QPQ); whereas the volume loss was 0.1045, 0.0999, and 0.0294 mm^3 , respectively.

Under the experimental conditions employed, Tenifer-QPQ showed the best improvement in wear resistance.

KEYWORDS: AISI 4140; coefficient of friction; volume loss; ferritic nitrocarburoizing; Tenifer; Tenifer-QPQ.

INTRODUCCIÓN

El acero AISI 4140 es un acero de medio carbono, aleado con cromo y molibdeno, que presenta buenas propiedades mecánicas como dureza, resistencia al desgaste y a la abrasión, por lo que es ampliamente utilizado en la industria para diversas aplicaciones en componentes mecánicos, tales como piezas de maquinaria de alta resistencia, árboles de levas, cigüeñales, ejes y pernos, entre otros [1], [2]. Sin embargo, las superficies de los aceros tienden a presentar fallas mecánicas debido a las condiciones de trabajo y al medio al que se encuentran sometidas [3]. Durante su vida en servicio, los componentes pueden estar expuestos a mecanismos de daño como fatiga superficial, abrasión y desgaste adhesivo, lo que provoca una disminución significativa de su vida útil [4], [5].

Este comportamiento representa un problema de gran relevancia industrial y energética. Holmberg y Erdemir [6] estimaron que aproximadamente el 23 % del consumo total de energía a nivel mundial se origina en contactos tribológicos; de este porcentaje, alrededor del 20 % se utiliza para vencer la fricción y el 3 % se destina a la remanufactura y sustitución de componentes debido a fallas asociadas al desgaste. Asimismo, se ha reportado que las pérdidas asociadas a la fricción y al desgaste contribuyen de manera significativa a las emisiones de CO_2 , estimando la generación de aproximadamente 480 millones de toneladas anuales. Por eso, implementar tecnologías avanzadas de ingeniería de superficies podría reducir el consumo energético global y generar ahorros económicos equivalentes a cerca del 1.4 % del producto interno bruto mundial [7], [8].

En ese sentido, la ingeniería de superficies desempeña un papel fundamental en la mejora del rendimiento y la funcionalidad de los materiales metálicos en diversos sectores industriales. La posibilidad de modificar las propiedades superficiales sin afectar el comportamiento mecánico del sustrato ha permitido mejorar la resistencia mecánica, la resistencia al desgaste y la protección contra la corrosión de los aceros empleados en aplicaciones críticas [9].

Dentro de este contexto, la nitrocarburiación en baño de sales aplicada al acero AISI 4140 mediante los procesos Tenifer y Tenifer-QPQ se presenta como una alternativa efectiva para mitigar el desgaste superficial. Estos tratamientos termoquímicos generan capas compuestas de nitruros de hierro y zonas de difusión que incrementan la dureza superficial y la resistencia al desgaste. En particular, el proceso Tenifer-QPQ incorpora una etapa adicional de postoxidación, que favorece la formación de una capa superficial de óxido, la cual puede influir en el comportamiento tribológico del material bajo condiciones de deslizamiento en seco [10].

De manera específica, existen antecedentes sobre el acero AISI 4140 sometido a procesos de nitrocarburiación/nitruación mediante distintas rutas y postratamientos.

Dalibón et al. [11] analizaron AISI 4140 nitruado por plasma con postoxidación, encontrando que la capa de óxido puede reducir el coeficiente de fricción al inicio bajo ciertas condiciones de contacto y mejorar la resistencia a la corrosión.

Yilmaz et al. [12] evaluaron la influencia del tiempo de postoxidación, en un AISI 4140 nitrocarburiado, identificando la coexistencia de fases ϵ y γ' junto con Fe_3O_4 , y reportando variaciones en rugosidad y fricción en función de la duración del postratamiento.

Por su parte, Chen et al. [13] aplicaron nitrocarburiación por sales con una oxidación subsecuente y evaluaron el efecto de shot peening en el desempeño a fatiga, reportando la transformación de la capa compuesta desde Fe_3N a Fe_2N tras la oxidación; además, observaron que el shot peening incrementó ligeramente el espesor de la capa y la profundidad total, aunque sin un efecto significativo adicional en fatiga respecto a la condición nitrocarburiada y oxidada. Finalmente, Daghbouch et al. [14] abordaron el nitruado gaseoso en AISI 4140 mediante diseño de experimentos y modelado, mostrando la influencia conjunta de carga, dureza y velocidad de deslizamiento en la pérdida de masa por desgaste adhesivo, así como condiciones de tratamiento que optimizan la dureza para minimizar dicha pérdida.

Con base en lo anterior, se plantea la hipótesis de que la nitrocarburiación en baño de sales mejora la resistencia al desgaste del acero AISI 4140 respecto al material base, y que el tratamiento Tenifer-QPQ presenta un desempeño tribológico superior al proceso Tenifer. El objetivo de este trabajo es evaluar y comparar el comportamiento tribológico del acero AISI 4140 sin tratamiento y tratado mediante los procesos Tenifer y Tenifer-QPQ, bajo una condición tribológica fija de deslizamiento en seco con el fin de establecer la influencia del postratamiento de oxidación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Tratamientos termoquímicos en baño de sales

Para este trabajo, primero se cortaron muestras de 8 mm de espesor a partir de una barra de acero AISI 4140 de 38.1 mm de diámetro, utilizando una cortadora metalográfica Buehler equipada con disco de diamante. Posteriormente, la preparación superficial se realizó mediante lijado secuencial desde grano 80 hasta 1200, seguido de pulido con suspensión de diamante de 6 μm hasta obtener un acabado tipo espejo, previo al tratamiento termoquímico.

Las muestras se sometieron a nitrocarburiación en baño de sales mediante los procesos Tenifer y Teni-

fer-QPQ (Quench-Polish-Quench), cuyo ciclo de tratamiento se presenta en la Figura 1. Ambos tratamientos se realizaron a 580 °C durante 90 min. La temperatura se encuentra dentro del intervalo empleado para la nitrocarburoización ferrítica de aceros de la familia AISI 4xxx (500–590 °C), en el que se favorece la formación de nitruros de hierro sin inducir transformación austenítica [10]. El tiempo de 90 min corresponde a una condición intermedia dentro del rango comúnmente reportado (60–120 min) para este tipo de tratamiento, en el que desarrollan una capa de compuestos y una zona de difusión representativas [11], [12]. En el proceso Tenifer-QPQ, posterior a la etapa principal de difusión en el baño de sales, se realiza un pulido superficial para mejorar el acabado, seguido de una etapa de postoxidación, que modifica la superficie del material.

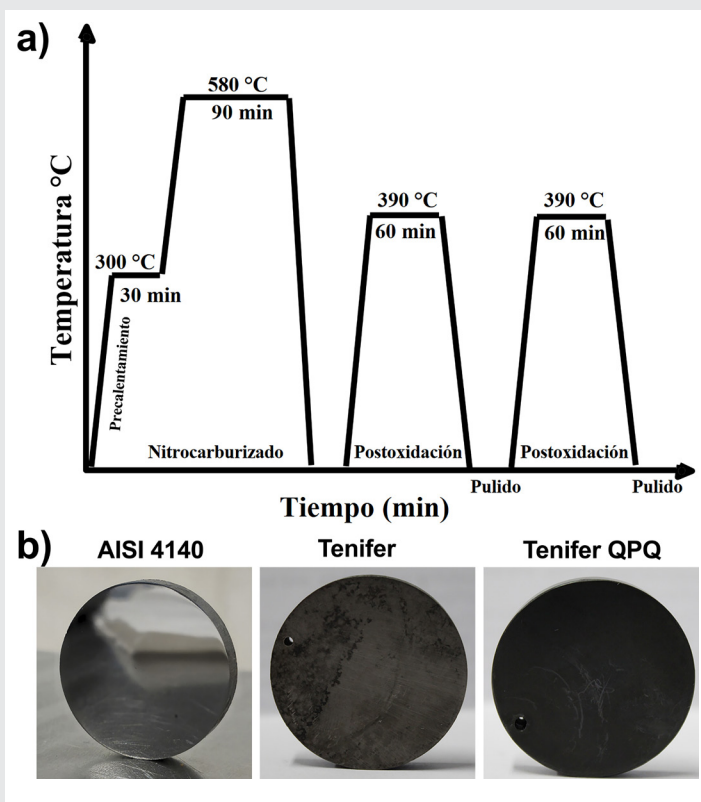


Figura 1. a) Diagrama del ciclo de los tratamientos termoquímicos; b) muestras utilizadas previo a pruebas de desgaste.

Fuente: Diagrama Hao Chen [13].

La formulación específica del baño (aditivos y parámetros de control/regeneración) no se detalla por tratarse de información propietaria del proveedor. No obstante, es conocido que el proceso se realiza en un recipiente de acero calentado que incorpora un sistema de aireación, el cual contiene una masa de sales fundidas basada principalmente en cianatos y carbonato alcalinos. Durante el tratamiento, el anión cianato reacciona de manera catalítica con la superficie de las piezas, promoviendo la liberación de especies reactivas de nitrógeno y la formación de carbonato en el medio, mientras

que la aireación contribuye a sostener la actividad del baño dentro de rangos controlados.

Caracterización microestructural y mecánica

Después de los tratamientos Tenifer y Tenifer-QPQ, se realizó un proceso metalográfico convencional. Primero se cortaron muestras de cada tratamiento en sección transversal, se encapsularon en baquelita y se prepararon mediante lijado hasta grano 1200 y pulido con suspensión de diamante de 6 μm . Finalmente, se aplicó ataque químico con Nital al 4 % para la observación de la microestructura. Los espesores de capa se midieron con microscopio óptico Olympus PMG 3.

Después, la identificación de fases se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) en un equipo Bruker D8. Las mediciones se obtuvieron en configuración de haces paralelos, con una configuración theta 10°, twin primario Soller 0.2°, y un escaneo tipo "Coupled two theta/theta" en modo continuo, en el rango de 30 a 80°, utilizando radiación Cu - $\alpha\alpha$. En estos ensayos se analizaron las tres condiciones: acero AISI 4140 sin tratamiento (4140), y muestras tratadas por Tenifer (T) y Tenifer-QPQ (T-QPQ).

A continuación, se hicieron los ensayos de microdureza Vickers, usando un microdurómetro Shimadzu HMV-G-FA-D mostrado (Figura 2), conforme a la norma ASTM C1327 [15]. Las microindentaciones se efectuaron en sección transversal, iniciando al centro de la capa blanca (capa de compuestos) y avanzando hacia el centro del sustrato. En los ensayos se aplicó una carga de 10 gf (98.07 mN), con un tiempo de permanencia de 15 s, y se realizaron 15 indentaciones con una separación de 20 μm entre ellas.

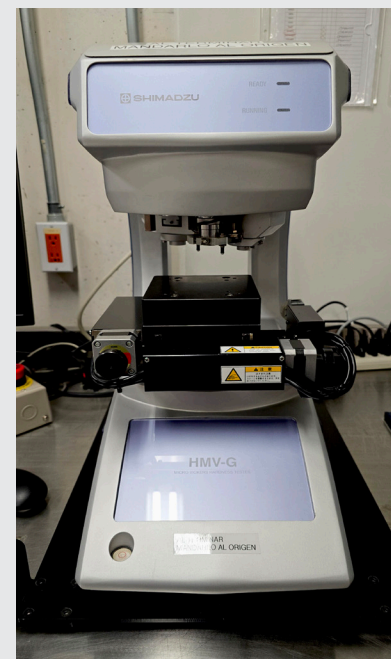


Figura 2. Microdurómetro utilizado para pruebas de microdureza. Fuente: Fotografía propia.

Caracterización Tribológica

Antes de realizar los ensayos de desgaste, se midieron las características de rugosidad Ra (rugosidad media aritmética), Rq (rugosidad media cuadrática) y Rz (altura máxima del perfil) de las tres condiciones (acero base con acabado espejo, Tenifer y Tenifer-QPQ). Las mediciones se realizaron con un rugosímetro Mitutoyo SJ-410 (Figura 3), conforme a la norma ISO 4287:1997. La adquisición de datos se efectuó mediante un perfil de superficie empleando un filtro Gauss para conservar únicamente el componente de rugosidad, con una velocidad de medición de 0.5 mm/s. Para cada muestra se realizaron cuatro mediciones desde el centro al exterior.



Figura 3. Rugosímetro utilizado para pruebas de rugosidad. Fuente: Fotografía propia.

A continuación, se realizaron los ensayos de desgaste en configuración bola-sobre-disco en condiciones secas, de acuerdo con la norma ASTM G99 [16], utilizando un tribómetro Anton Paar TRB³ (Figura 4). Como contraparte se empleó una esfera de alúmina (Al₂O₃) de 5 mm de diámetro. Previo a cada ensayo, tanto la esfera como las superficies de las muestras (AISI 4140 base, Tenifer y Tenifer-QPQ) se limpiaron con alcohol isopropílico.

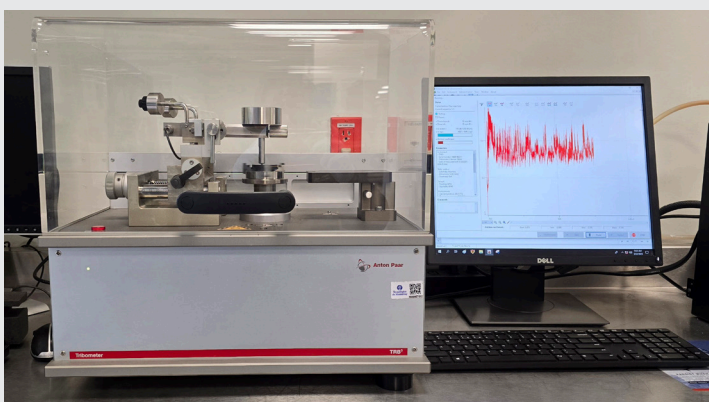


Figura 4. Tribómetro utilizado para pruebas perno sobre disco. Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas se efectuaron con una carga normal de 5 N, lo que representa valores de presiones máximas de contacto de $4140\text{-}\sigma_{\text{max}} \approx 1.46 \text{ GPa}$, $T\text{-}\sigma_{\text{max}} \approx 1.54 \text{ GPa}$ y $T\text{-QPQ-}\sigma_{\text{max}} \approx 1.5 \text{ GPa}$; en los ensayos se consideró una distancia de deslizamiento de 250 m y una velocidad constante de 0.15 m/s. El coeficiente de fricción se registró mediante el sistema de adquisición del equipo y se reportó como el promedio calculado por el tribómetro a lo largo de toda la prueba.

Posteriormente, las huellas de desgaste se caracterizaron mediante microscopía óptica para medir el ancho de pista w . El valor de w se obtuvo como el promedio de 16 mediciones distribuidas a lo largo de toda la pista de desgaste. El radio de pista R se determinó a partir de la geometría de montaje del tribómetro, midiendo la distancia desde el centro del disco hasta la trayectoria de deslizamiento (centro de la pista de desgaste). El volumen perdido del disco (V) se estimó conforme a la ecuación 2.2 de la norma ASTM G99:

$$V = \frac{\pi R w^3}{6 r} \quad \text{Ec. (1)}$$

Ecuación: volumen perdido ASTM G99 [[16]]

donde V es el volumen perdido del disco (mm^3), R es el radio de la pista (mm), w es el ancho de la pista (mm) y r es el radio de la esfera (mm).

RESULTADOS

Microestructura y dureza

La Tabla 1 resume los espesores de la capa blanca y de la zona de difusión obtenidos con los tratamientos Tenifer y Tenifer-QPQ. Para Tenifer, la capa blanca presentó un espesor de $10.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ mientras que para Tenifer-QPQ se registró $13.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$. En cuanto a la zona de difusión, Tenifer alcanzó $250 \pm 20 \mu\text{m}$ y Tenifer-QPQ $280 \pm 20 \mu\text{m}$. Estos resultados muestran que el tratamiento Tenifer-QPQ generó una capa blanca ligeramente más gruesa y una zona de difusión mayor bajo las condiciones de proceso empleadas. A pesar de que ambos tratamientos se realizaron bajo los mismos parámetros nominales ($580 \text{ }^\circ\text{C}$ por 90 min), el TTQ Tenifer-QPQ presentó una capa blanca y una zona de difusión mayores que el TTQ Tenifer. Esta diferencia sugiere que la secuencia adicional propia del QPQ (pulido y postoxidación) influye en el estado final de la capa formada, más allá de un cambio de acabado superficial. En particular, durante el postratamiento QPQ puede ocurrir movilidad del N y C, favoreciendo un crecimiento mayor. La Figura 5 presenta las micrografías en sección transversal para ambas condiciones.

Tabla 1. Espesores de capa.

	Tenifer	Tenifer-QPQ
Capa Blanca, μm	10.3 ± 1	13.5 ± 0.5
Zona de Difusión, μm	250 ± 20	280 ± 20

Fuente: Elaboración propia

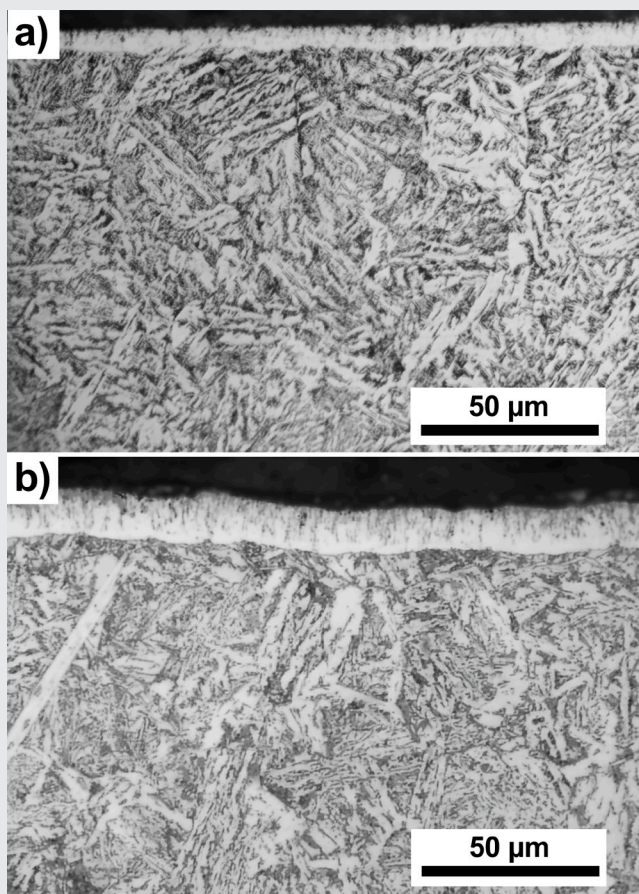


Figura 5. Micrografías de las muestras expuestas a los tratamientos termoquímicos: a) Tenifer; b) Tenifer-QPQ
Fuente: Elaboración propia.

fer-QPQ se alcanzaron valores cercanos a $\sim 1021 \text{HV}_{0.01}$. En ambos casos, la dureza decreció progresivamente conforme se avanzaba hacia el interior del sustrato, este comportamiento es denominado perfil por difusión, e indica el gradiente de presencia de N asociado a la capa formada y a la zona de difusión. Aproximadamente a $\sim 300 \mu\text{m}$, los valores se asemejan al rango del sustrato AISI 4140 (≈ 300 a 400HV). Es posible observar que Tenifer-QPQ presentó un nivel de dureza superior a lo largo del perfil.

La Figura 6 muestra los patrones de difracción obtenidos para 4140, T y T-QPQ. En el primero (Figura 6a), solamente se tiene la presencia de la fase $\alpha\text{-Fe}$ (ferrita), mientras que en Tenifer (Figura 6b) se identifican las fases $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ y $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$, asociadas a la capa blanca generada por la nitrocarburoización ferrítica. Luego, en la Figura 6c, que corresponde a Tenifer-QPQ, además de las fases $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ y $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$, se detectó la presencia de Fe_3O_4 .

La detección de Fe_3O_4 en Tenifer-QPQ es consistente con la etapa de post-oxidación aplicada. Al transferir las piezas a un medio oxidante basado en nitratos-nitritos tras la nitrocarburoización y repetir el tratamiento después del pulido, se favorece la formación de una película superficial de magnetita, asociada con la apariencia negra característica del proceso y con un aporte a la resistencia a la corrosión de la superficie nitrocarburoizada.

Por otro lado, la Figura 7 presenta los perfiles de microdureza Vickers medidos en sección transversal desde la superficie hacia el interior del sustrato. En el tratamiento termoquímico Tenifer se observó una dureza superficial de $\sim 780 \text{HV}_{0.01}$, mientras que en Teni-

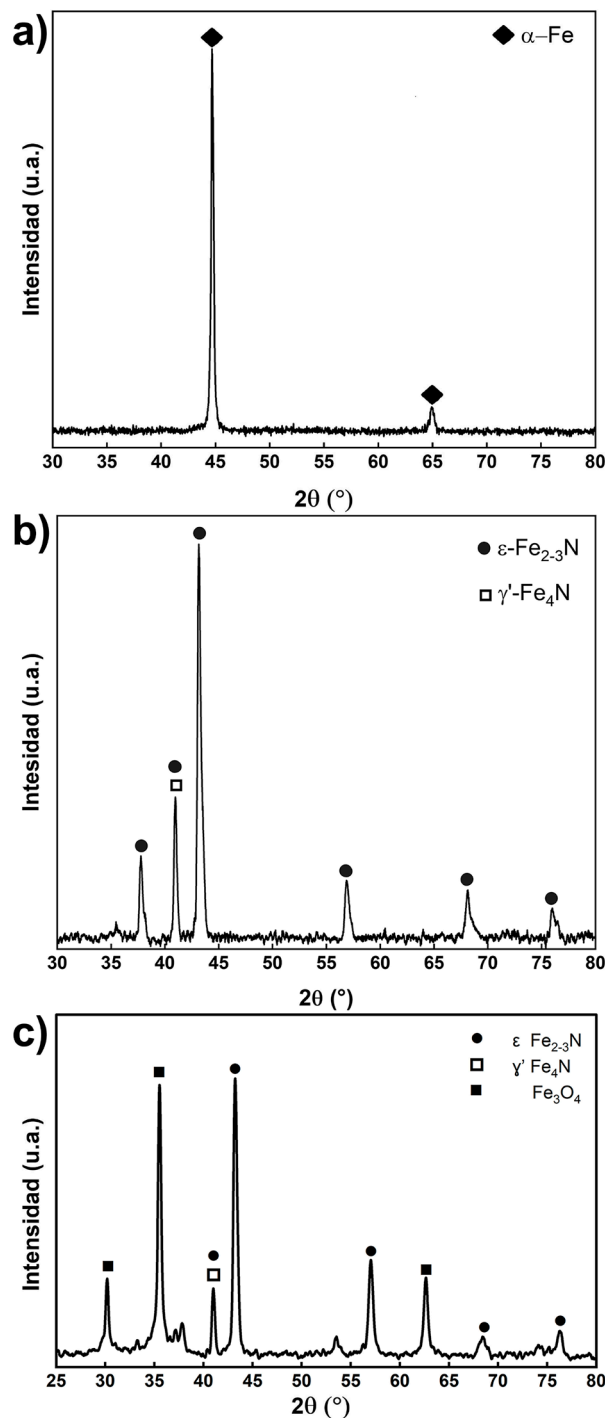


Figura 6. Patrones de difracción obtenidos en a) 4140; b) Tenifer; c) Tenifer-QPQ.
Fuente: Elaboración propia.

El incremento en los niveles de microdureza en TTQ Tenifer-QPQ puede asociarse a la secuencia de postratamientos del ciclo QPQ. Se reporta que la postoxidación redistribuye el nitrógeno, favoreciendo su enriquecimiento bajo la película de óxido y generando modificaciones en la capa compuesta. Además, la secuencia QPQ incorpora un pulido intermedio que puede remover la zona porosa superficial típica de la capa compuesta y exponer una región más densa antes de la oxidación final. En conjunto, estos efectos explican una capa blanca más dura en Tenifer-QPQ.

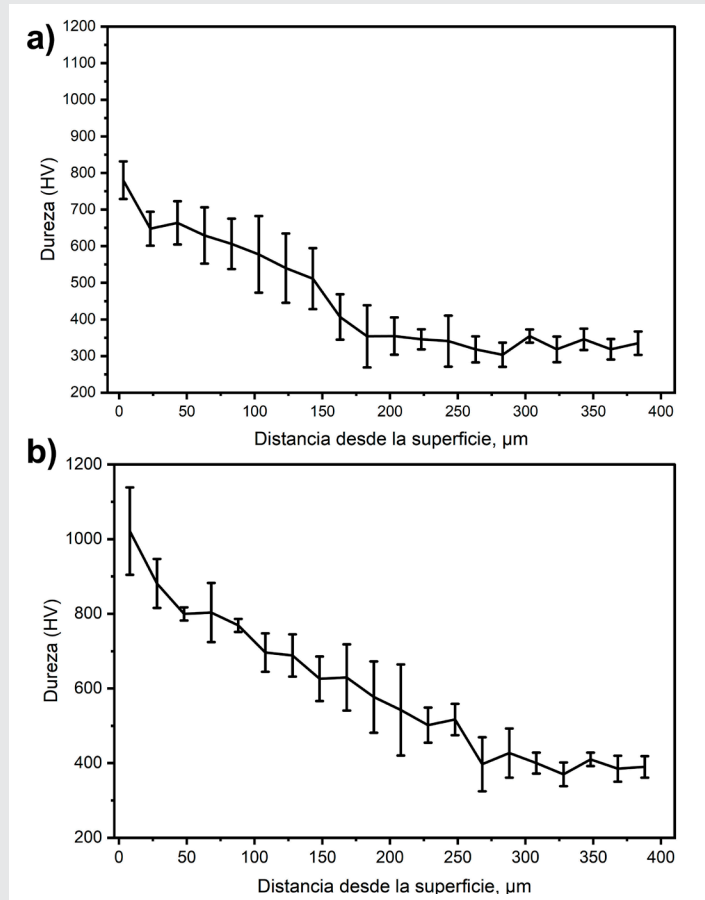


Figura 7. Gráfica de perfil de microdureza Vickers en sección transversal: a) Tenifer; b) Tenifer-QPQ.

Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento tribológico

La Tabla 2, muestra los valores de rugosidad superficial (R_a , R_q y R_z) obtenidos a partir de cinco mediciones por condición.

Tabla 2. Rugosidad superficial conforme a ISO 4287:1997.

Condición	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)
4140	0.017 ± 0.005	0.023 ± 0.026	0.145 ± 0.038
Tenifer	0.220 ± 0.007	0.282 ± 0.031	1.726 ± 0.053
Tenifer-QPQ	0.185 ± 0.049	0.242 ± 0.254	1.487 ± 0.257

Fuente: Elaboración propia

Coefficiente de fricción (CoF)

En la Figura 8 se observa el comportamiento del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para las tres condiciones evaluadas, bajo deslizamiento en seco. En todos los casos se presenta una etapa transitoria inicial mientras se acoplan los pares tribológicos. En el acero AISI 4140, en esta etapa transitoria el CoF inicia con valores cercanos a ~ 0.6 y desciende hacia ~ 0.45 durante los primeros metros, para posteriormente mantenerse alrededor de un nivel cercano a su promedio (0.492) a lo largo del recorrido, con variaciones moderadas. En la condición Tenifer el CoF parte alrededor de ~ 0.68 a 0.70 y muestra una tendencia ascendente gradual conforme a la distancia recorrida, alcanzando valores instantáneos del orden de entre ~ 0.85 y 0.88 hacia el final del ensayo, por tanto, su CoF promedio es de 0.775 . Para Tenifer-QPQ, el CoF se mantiene en un nivel bajo entre una distancia de ~ 5 a ~ 130 m, presentando valores de entre ~ 0.30 y 0.35 , pero con mayor fluctuación que en las otras condiciones. Luego, en T-QPQ se aprecia una transición aproximadamente entre ~ 130 y 145 m, donde el CoF se incrementa ligeramente alrededor de ~ 0.40 a 0.45 , lo que puede asociarse a la interacción de los debris de residuos generados durante la prueba. Los valores promedio reportados por el equipo fueron 0.492 , 0.775 y 0.378 para AISI 4140, Tenifer y Tenifer-QPQ, respectivamente.

En la comparación entre el acero AISI 4140 y la condición Tenifer, el menor CoF del 4140 puede relacionarse con su menor rugosidad superficial. La Tabla II muestra que con el proceso Tenifer se incrementan significativamente R_a , R_q y R_z respecto al acabado espejo del 4140, lo que implica una topografía con mayor presencia de asperezas. Bajo deslizamiento en seco, esto favorece un contacto más severo entre asperezas y, por tanto, una mayor fricción. En consecuencia, es posible explicar que el acero 4140 presente un CoF promedio menor que Tenifer bajo las mismas condiciones de ensayo.

Además, el menor CoF observado en Tenifer-QPQ puede atribuirse a la modificación de la interfase de deslizamiento inducida por la postoxidación y el pulido intermedio del ciclo QPQ. En particular, se ha reportado que la postoxidación en condiciones relativamente bajas favorece la formación de una película densa de magnetita sobre la capa nitrocarburizada (Tenifer), esta capa puede sellar/llevar poros presentes en la capa compuesta y disminuir la superficie efectiva de contacto, reduciendo así la contribución adhesiva y la fricción durante una parte importante del ensayo. A partir de lo anterior, es posible elucidar que T-QPQ muestre un CoF menor y, hacia el final del recorrido, un incremento asociado a cambios del estado superficial conforme progresa el desgaste.

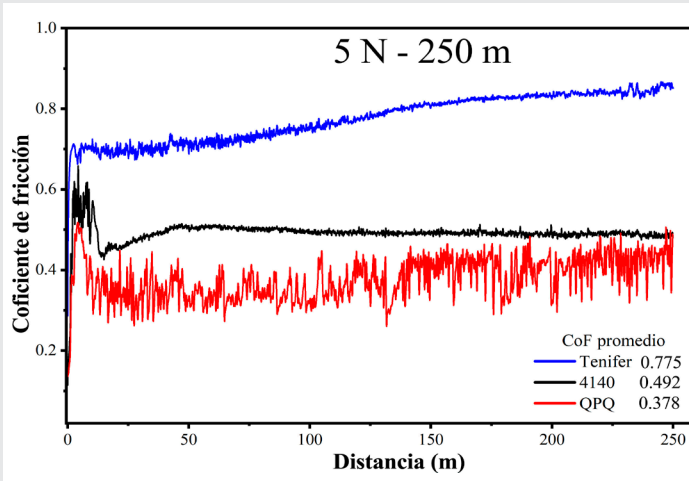


Figura 8. Gráfica de Coeficiente de fricción CoF (μ) en función de la distancia de deslizamiento.
Fuente: Elaboración propia.

Huellas de desgaste

Además, en la Figura 9 se observan micrografías representativas de las pistas de desgaste obtenidas en las muestras de las tres condiciones estudiadas. Es posible observar que en la muestra de 4140 (Figura 9a) el ancho de la pista es de $495 \mu\text{m}$. En comparación, tanto en Tenifer (Figura 9b) como en Tenifer-QPQ (Figura 9c), las pistas presentaron un ancho de $485 \mu\text{m}$ y $330 \mu\text{m}$, respectivamente. Además, se observa que la pista de desgaste en la condición 4140 presenta mecanismos de deformación plástica y adhesión severa, con surcos de arado profundos que evidencian la baja resistencia del sustrato; las manchas negras dentro del canal corresponden a material adherido, residuos del acero que fueron atrapados en el tribopar. Por otro lado, en las muestras TyT-QPQ los mecanismos predominantes también son arado, con menor presencia de material adherido, lo que corresponde a desgaste oxidativo y abrasión leve. Particularmente en la condición T-QPQ, la estabilidad de la capa de magnetita y la menor rugosidad favorecen un régimen de desgaste suave (mild wear), donde la generación de debris es mínima y la integridad de la superficie se mantiene durante un mayor periodo del ensayo.

Finalmente, en la Tabla 3, se presentan los resultados de volumen perdido de las tres condiciones investigadas, estos se calcularon utilizando la ecuación 1. Se puede observar que 4140 presentó un volumen perdido de 0.1045 mm^3 , el cual es aproximadamente 1.05 veces mayor que el de Tenifer (0.0999 mm^3) y 3.56 veces mayor que el de Tenifer-QPQ (0.0294 mm^3). Entonces, el tratamiento Tenifer mostró una ligera reducción del volumen perdido respecto al acero 4140 sin tratamiento; mientras que Tenifer-QPQ presentó una considerable disminución, lo que indica un claro incremento en la resis-

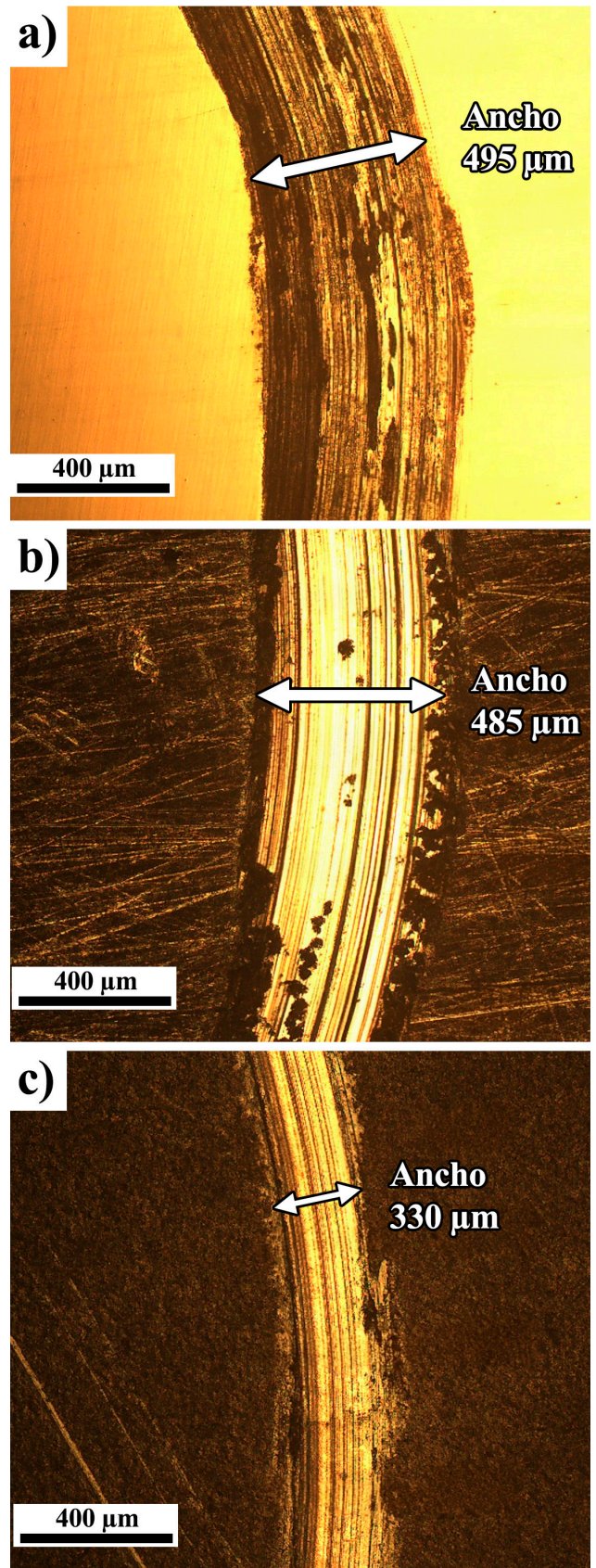


Figura 9. Micrografías de las pistas de desgaste realizadas con 5 N y 250 m de deslizamiento en: a) 4140; b) Tenifer; c) Tenifer-QPQ.
Fuente: Elaboración propia.

tencia al desgaste, bajo las condiciones ensayadas. Al comparar ambos tratamientos, T-QPQ presentó un volumen perdido ~3.40 veces menor que T, lo que puede asociarse a la contribución del proceso QPQ: la condición superficial tras el postratamiento (formación de óxidos y modificación de la capa externa) y el mayor endurecimiento superficial favorecen un contacto más estable y una menor remoción de material durante el deslizamiento en seco.

Tabla 3. Resultados de volumen perdido en las pruebas de desgaste realizadas con 5 N y 250 m de deslizamiento.

Condición	Volumen perdido, (mm ³)
AISI 4140	0.1045
Tenifer	0.0999
Tenifer QPQ	0.0294

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el efecto de la nitrocarburoización en baño de sales y de un postratamiento de oxidación sobre el desempeño tribológico del acero AISI 4140, comparando el acero sin tratamiento, con los procesos Tenifer y Tenifer-QPQ, bajo deslizamiento en seco. Ambos tratamientos generaron una capa de compuestos y una zona de difusión, siendo mayores en Tenifer-QPQ ($13.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ y $280 \pm 20 \mu\text{m}$) que en Tenifer ($10.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ y $250 \pm 20 \mu\text{m}$), junto con un endurecimiento superficial superior ($\approx 1021 \text{HV}0.01$ contra $\approx 780 \text{HV}0.01$). Los resultados de difracción de rayos X confirmaron la formación de $\epsilon\text{-Fe}_2\text{-}_3\text{N}$ y $\gamma\text{'-Fe}_4\text{N}$ en ambas condiciones tratadas, y la presencia de Fe_3O_4 en Tenifer-QPQ, asociada a la etapa de postoxidación. En términos tribológicos, Tenifer incrementó (0.775) el CoF promedio respecto a la condición base (0.492), mientras que Tenifer-QPQ lo redujo (0.378) y presentó la menor pérdida de volumen (0.0294 mm³), equivalente a ~3.6 veces menor que el acero base y ~3.4 veces menor que Tenifer. En conjunto, los resultados muestran que la secuencia Tenifer-QPQ proporciona el mayor beneficio en resistencia al desgaste para AISI 4140 bajo las condiciones evaluadas, al combinar una capa superficial más endurecida y una condición superficial modificada por el postratamiento

AGRADECIMIENTOS

Este estudio contó con el apoyo (25221.26-P) del Tecnológico Nacional de México a través de la Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Humanística, de Desarrollo Tecnológico e Innovación 2026.

Los autores agradecen al ITESM por el uso de sus instalaciones en los Campus Santa Fé y Estado de México para realizar este trabajo.

Abreviaturas

QPQ	Quench-Polish-Quench
TTQ	Tratamiento Termoquímico
DRX	Difracción de Rayos X
AISI	American Institute of Iron and Steel
MO	Microscopio Óptico

BIBLIOGRAFÍA

[1] ASM International, Ed., "ASM Handbook, Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys," in ASM Handbook, vol. 1, Materials Park: ASM International, 1990, ch. Alloy Steels, p. 95.

[2] W. A. Khan, Q. Hayat, F. Ahmed, M. Ali, and M. Zain-ul-Abdein, "Comparative assessment of mechanical properties and fatigue life of conventional and multistep rolled forged connecting rods of high strength AISI/SAE 4140 steel," *Metals.*, vol. 13, no. 6, p. 1035, Jun. 2023, doi: 10.3390/met13061035.

[3] M. R. Ranju, P. M. Abhilash, and D. Kesavan, "Rolling contact fatigue studies on AISI 4140 steel under formulated lubrication conditions with nano graphene additives," *Wear*, vol. 544–545, May 2024, doi: 10.1016/j.wear.2024.205311.

[4] Gurumurthy, S. S. Sharma, Gowrishankar, Sowmith, Abhishek, and A. Devar, "Study of Mechanical Properties of Dual Phase EN19 Steel (AISI4140)," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 37, pp. 1–6, Oct. 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i37/97422.

[5] L. Wang, L. Yang, L. Wang, X. Tang, and G. Liu, "Influence mechanism of grinding surface quality of 20CrMnTi steel on contact failure," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. Art. no. 14362, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-64320-0.

[6] K. Holmberg and A. Erdemir, "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions," *Friction*, vol. 5, no. 3, pp. 263–284, Sep. 2017, doi: 10.1007/s40544-017-0183-5.

[7] K. Holmberg, P. Kivikytö-Reponen, P. Härkisaari, K. Valtonen, and A. Erdemir, "Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry," *Tribol. Int.*, vol. 115, pp. 116–139, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.

[8] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Ciencia e ingeniería de materiales*, 9th ed., vol. 1. Barcelona: Reverté, 2019.

[9] M. Ramezani, Z. Mohd Ripin, T. Pasang, and C. P. Jiang, "Surface Engineering of Metals: Techniques, Characterizations and Applications," *Metals.*, vol.

13, no. 7, p. Art. no. 1299, Jul. 2023, doi: 10.3390/met13071299.

[10] L. Bellas, G. Castro, L. Mera, J. L. Mier, A. García, and A. Varela, "Estudio comparativo de la nitrocarburoización de los aceros AISI 4340 y AISI 347 mediante el proceso Tenifer-QPQ[®]," *Rev. Metal.*, vol. 55, no. 1, p. e136, Jan. 2019, doi: 10.3989/rev-metalm.136.

[11] E. L. Dalibón, S. P. Brühl, I. Silva Cardenas, G. Prieto, and W. Tuckart, "Tribological and Corrosion Behavior of Oxidized and Plasma Nitrided AISI 4140 Steel," *Mater. Perform. Charact.*, vol. 12, no. 3, pp. 297–308, Jul. 2023, doi: 10.1520/MPC20220089.

[12] U. T. Yilmaz, A. Erkan, N. Akar, and V. Kilicli, "Effect of post-oxidation times in the nitrocarburi- zing process on the wear behavior of an AISI 4140 steel," *Materials Testing*, vol. 66, no. 11, pp. 1782–1794, Nov. 2024, doi: 10.1515/mt-2024-0062.

[13] H. Chen, T. C. Chen, H. H. Hsu, and L. W. Tsay, "Effect of Microstructure and Compressive Resi- dual Stress on the Fatigue Performance of AISI 4140 Steel with QPQ Salt-Bath Nitro-Carburizing," *Mate- rials*, vol. 18, no. 9, p. Art. no. 1995, May 2025, doi: 10.3390/ma18091995.

[14] A. Daghbouch, B. Louhichi, and M. A. Terres, "Optimization and Prediction of Mass Loss During Adhesive Wear of Nitrided AISI 4140 Steel Parts," *Crystals (Basel)*, vol. 15, no. 10, p. Art. no. 875, Oct. 2025, doi: 10.3390/cryst15100875.

[15] "Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics," Aug. 01, 2008, ASTM In- ternational, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/ C1327-08.

[16] "Test Method for Wear Testing with a Pin-on- Disk Apparatus," Apr. 01, 2010, ASTM Internatio- nal, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/G0099- 05R10.





Mecánica *de* Materiales

Ingeniantes

Comparativo con enfoque didáctico de análisis de armaduras en 2D utilizando SOLIDWORKS Simulation

RESUMEN: Este artículo presenta un estudio comparativo entre el análisis manual clásico y el análisis por simulación computacional de una estructura tipo armadura bidimensional, con fines didácticos. El ejercicio parte del cálculo manual de reacciones, fuerzas internas, esfuerzos normales y factores de seguridad, en un caso de aplicación de una estructura Pratt, utilizando los métodos desarrollados en los cursos de Estática y Mecánica de Materiales a nivel de ingeniería. Posteriormente, se replica el mismo caso en SOLIDWORKS Simulation 2024, utilizando elementos de armadura modelados mediante el entorno de análisis estático lineal del software. Se comparan los resultados obtenidos por ambos métodos y se discute su concordancia. Se determinan las reacciones en apoyos, fuerzas en elementos, esfuerzos axiales y factores de seguridad. Este caso permite complementar los métodos analíticos vistos en clase.

Usando el mismo flujo de trabajo de la simulación se pueden analizar estructuras con mayor número de elementos, lo que facilita la transición hacia temas de cursos posteriores que integran técnicas de simulación asistida por computadora. El enfoque aquí expuesto se plantea como una alternativa para complementar la enseñanza de la ingeniería mecánica.

PALABRAS CLAVE: Simulación en Ingeniería Mecánica, Enseñanza en Ingeniería, SOLIDWORKS Simulation, Método de Nodos, Método de Secciones.



Colaboración

Alejandro Avila Delgado; Arturo Morales Benavides, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua

Fecha de recepción: 28 de noviembre de 2025

Fecha de aceptación: 19 de marzo del 2026

Autor de Correspondencia: Alejandro Avila Delgado

ABSTRACT: This article presents a comparative study between classical manual analysis and computer-based simulation of a two-dimensional truss structure for educational purposes. The exercise begins with the manual calculation of support reactions, internal member forces, normal (axial) stresses, and factors of safety in an application case involving a Pratt truss, using methods taught in undergraduate Statics and Mechanics of Materials. The same case is then replicated in SOLIDWORKS Simulation 2024, employing truss elements within the software's linear static analysis environment. Results from both approaches are compared and their agreement is discussed. Reactions at supports, member forces, axial stresses, and factors of safety are reported. The case complements the analytical methods covered in class.

Using the same simulation workflow, structures with a larger number of members can be analyzed, facilitating the transition to subsequent courses that integrate computer-aided simulation. The approach is proposed as an effective complement to the teaching of mechanical engineering.

KEYWORDS: Mechanical Engineering Simulation, Engineering Education, Static Analysis, Method of Joints, Method of Sections.

INTRODUCCIÓN

El análisis de estructuras en dos dimensiones constituye un componente muy importante en los cursos de estática y mecánica de materiales en carreras como ingeniería electromecánica y mecánica, entre otras. En estos cursos se introducen de manera formal los conceptos de equilibrio, esfuerzos internos y factores de seguridad que se expanden en cursos subsecuentes y en la práctica profesional [1] [2], [3]. Al mismo tiempo, los paquetes de simulación han madurado hasta convertirse en herramientas docentes y profesionales valiosas: permiten visualizar distribuciones de esfuerzos y factores de seguridad, así como reforzar la conexión entre teoría y aplicación industrial [5], [9], [13]. No obstante, el uso eficaz de estos

entornos sigue teniendo como base la comprensión de los fundamentos teóricos; la simulación complementa los métodos analíticos desarrollados en clase y permite al estudiante iniciarse en el uso de herramientas de simulación [2], [3], [6].

Diversos trabajos han documentado beneficios didácticos al integrar simulación con ejercicios tradicionales, como son: mejoras en la precisión frente a cálculos manuales, reducción de errores de planteamiento y mayor motivación del estudiantado al contrastar resultados numéricos con gráficos de esfuerzos y factores de seguridad [8]-[11], [13]. En el ámbito educativo, se ha propuesto además el diseño de materiales instruccionales específicos para que el estudiantado transite de la resolución “a mano” a la validación por elementos finitos (FEA), con guías paso a paso y criterios de calidad de modelos [12]. En el contexto de SOLIDWORKS Simulation, existe literatura técnica y tutorial que sistematiza buenas prácticas de modelado, asignación de materiales, definición de apoyos y cargas, así como estrategias de mallado e interpretación de resultados [5]-[7].

A pesar de estos avances, persiste una necesidad de secuencias didácticas que vinculen: (i) el cálculo manual de reacciones y fuerzas internas (método de nodos), (ii) la obtención de esfuerzos normales y factores de seguridad y (iii) la réplica controlada del caso en un entorno de simulación, asegurando la consistencia entre las hipótesis analíticas (miembros articulados que solo transmiten carga axial) y la configuración del modelo en un entorno de simulación [2], [3], [6], [7]. Atender dicha consistencia es particularmente relevante cuando se usan elementos tipo truss configurados con carga axial en estructuras planas [5], [6], [7], [10], [11].

Este trabajo plantea como pregunta guía si, al configurar el modelo de simulación de acuerdo con las hipótesis del método de nodos (miembros articulados y carga axial), es posible reproducir los resultados del cálculo manual con un error relativo $\leq 1\%$ en las salidas clave. El objetivo es documentar un flujo de trabajo reproducible y evaluar la concordancia entre ambos enfoques en una armadura Pratt 2D.

Se comparan, de forma directa, los resultados calculados a mano (tabulados en Excel) con los generados por SOLIDWORKS Simulation. El procedimiento inicia con los resultados analíticos de un caso representativo y, después, se replica en SOLIDWORKS Simulation 2024 mediante un estudio estático lineal. Se obtienen cuatro salidas clave –reacciones en los apoyos, fuerzas por elemento (tensión/compresión), esfuerzos normales y factor de seguridad– y se contrastan con los valores teóricos. La contribución es doble: proveer una secuencia didáctica clara y reproducible que preserve la teoría esencial y demostrar que la simulación facilita escalar hacia estructuras más complejas, preparando

al estudiantado para cursos posteriores donde la simulación asistida por computadora es parte integral del currículo [5], [9]-[13].

MATERIAL Y MÉTODOS

Pasos para simular una estructura con elementos tipo truss en SolidWorks Simulation

Este trabajo se desarrolla bajo la metodología de un estudio de caso aplicado al análisis estructural en dos dimensiones, con enfoque académico. Se toma como referencia el contenido de los cursos de Mecánica de Materiales (EMJ-1021) y Estática (EME-1012) impartidos en Ingeniería Electromecánica del TecNM, ya que el contenido es equivalente al de otras carreras de ingeniería, como Mecánica, Mecatrónica y Civil. En estas materias se abordan los temas de análisis de estructuras tipo armadura por los métodos de nodos y secciones, reacciones en los apoyos, fuerzas axiales, esfuerzo axial y factor de seguridad.

En cuanto al alcance didáctico, el estudio se concentra en la verificación de resultados (manual vs. simulación) y en la documentación del procedimiento de simulación. La evaluación pedagógica cuantitativa (rúbricas o medición diagnóstica y final) se considera trabajo futuro para medir el impacto de usar este enfoque en el aula.

Selección Del Caso De Estudio

El análisis se realiza sobre una estructura formada por elementos rectos sometidos a carga axial (armadura 2D). Se eligió una estructura tipo Pratt porque ofrece una complejidad adecuada: no es trivial de resolver manualmente y permite mostrar las ventajas de analizar una estructura así por medio de una simulación. Además, corresponde con los contenidos de los cursos mencionados.

La estructura bajo estudio se muestra en la Figura 1. Esta estructura consta de 21 elementos conectados en 12 nodos. El elemento central FG es el eje de simetría de la estructura.

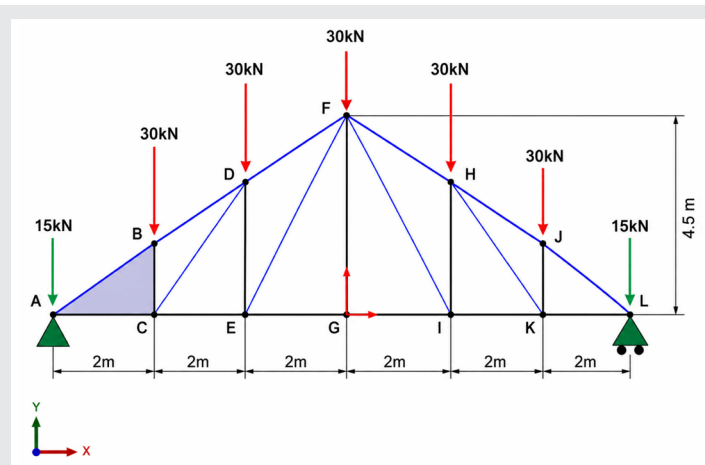


Figura 1. Estructura Pratt bajo análisis y ejes de referencia. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo Manual (Método Analítico)

Adicional a la información mostrada en la Figura 1, los siguientes datos son necesarios para completar el análisis manual:

Cada miembro es un perfil estructural ISO, tubo cuadrado 80x80x5 mm. El área de sección transversal es de 0.001435 m²

Material: Acero ASTM A36, E = 200 GPa, ν = 0.29, σ_y = 250 MPa.

- Tipo de apoyo: Apoyo fijo en nodo A, totalmente restringido. Apoyo de rodillo en nodo L (sin reacción en X).

Cargas: Puntuales en cada una de las juntas (B, D, F, H, J) = 30 000 N en dirección -Y, mientras que en los nodos A y L = 15 000 N en dirección -Y.

Salidas de interés: Reacciones en apoyos; fuerza por elemento (tensión/compresión); esfuerzo normal; factor de seguridad (FdS = σ_y/σ). [4]

Como primer paso, se realiza un análisis manual (analítico) aplicando los métodos de nodos y secciones, iniciando con el cálculo de las reacciones en los apoyos. Estos resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Reacciones en los apoyos. Cálculo manual

Reacciones en los apoyos		
Apoyo	Reacción axial [kN]	Dirección
A	90.0	Y+
L	90.0	Y+

Fuente: Elaboración propia.

Se continúa con el cálculo de longitudes y fuerzas axiales en cada barra, así como el estado de esta (tensión/compresión). Estos resultados se muestran en la Tabla 2. Para simplificar la presentación de los resultados y aprovechando la simetría de la estructura, a partir de aquí se presentan los resultados para la mitad izquierda de la estructura, incluyendo el elemento central FG. Para el lado derecho, los valores son igual al elemento correspondiente. De esta manera, AB tiene los mismos valores que JL, BC que JK y así sucesivamente.

Posteriormente, usando los procedimientos analíticos de mecánica de materiales se calculan el esfuerzo axial σ y el factor de seguridad FdS; sus valores se reportan en la Tabla 3. No se consideró la deformación axial, la cual, aunque es tema de interés en Mecánica de Materiales, en la versión estudiantil de SOLIDWORKS Simulation el menú de resultados no cuenta con una opción para obtener directamente este resultado.

Tabla 2. Fuerzas y estado de cada elemento. Cálculo manual.

Fuerzas y estado por elemento. Cálculo Manual			
Elemento	Longitud [m]	Fuerza axial [kN]	Estado
AB	3.75	125.0	Compresión
AC	3.00	100.0	Tensión
BD	3.75	125.0	Compresión
BC	2.25	30.0	Compresión
CD	5.41	36.1	Tensión
CE	3.00	80.0	Tensión
DF	3.75	100.0	Compresión
DE	4.50	45.0	Compresión
EF	7.39	49.2	Tensión
EG	3.00	60.0	Tensión
FG	6.75	0.0	Tensión

Fuente: Elaboración propia.

Las expresiones utilizadas en este estudio son:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \tag{Ec (1)}$$

$$FdS = \frac{\sigma_y}{\sigma}, \tag{Ec (2)}$$

Donde F es la fuerza axial del elemento, A el área de la sección transversal y σ_y el esfuerzo de fluencia del material. No se identificaron miembros con FdS < 2.5. Dado que FG no soporta carga axial en este caso, no se evalúa su FdS (la razón σ_y/σ carece de sentido cuando σ=0).

Tabla 3. Esfuerzos y factor de seguridad. Cálculo manual

Esfuerzo y FdS por elemento. Cálculo Manual		
Elemento	Esfuerzo [MPa]	FdS
AB	87.1	2.87
AC	69.7	3.59
BD	87.1	2.87
BC	20.9	11.96
CD	25.1	9.96
CE	55.7	4.49
DF	69.7	3.59
DE	31.3	7.98
EF	34.3	7.29
EG	41.8	5.98
FG	0.0	N/A

Nota: El factor de seguridad sólo se calcula cuando la carga es mayor a cero.

Fuente: Elaboración propia.

Simulación Computacional

Concluidos los cálculos manuales, se procede a configurar el estudio de simulación en SOLIDWORKS Simulation 2024, con un análisis estático lineal para estructuras tipo armadura. Las condiciones de frontera se definen conforme a los apoyos utilizados en el análisis manual (apoyo fijo y apoyo móvil), y se aplican las mismas cargas puntuales. La simulación se ejecuta bajo licencia educativa del software en el entorno de laboratorio.

Parámetros del estudio

Tipo de estudio: Estático lineal 2D (entorno de SOLIDWORKS Simulation 2024, licencia educativa).

Tipo de elemento: Tipo truss (solo carga axial), implementado en SOLIDWORKS con elemento viga configurado para comportamiento de armadura (sin flexión ni cortante).

Geometría/miembro: Perfil estructural ISO, tubo cuadrado 80×80×5 mm (Piezas soldadas → Miembro estructural). El área de sección transversal es de 0.001435 m²

Material: Acero ASTM A36, $E = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0.29$, $\sigma_y = 250 \text{ MPa}$.

Condiciones de frontera: Apoyo fijo en nodo A; apoyo de rodillo en nodo L (sin reacción en X).

Cargas: Puntuales en cada una de las juntas (B, D, F, H, J) = 30 000 N en dirección -Y. en A, L = 15 000 N en dirección -Y.

Malla: Automática; tamaño base por defecto.

Solver: Direct Sparse. En las propiedades del estudio seleccionar el solver Direct Sparse

Salidas de interés: Reacciones en apoyos; fuerza por elemento (tensión/compresión); esfuerzo normal; factor de seguridad ($FdS = \sigma_y/\sigma$).

Validación/comparación: Error relativo (%) vs. resultados manuales por nodo/elemento.

Flujo De Trabajo En La Simulación

A continuación, se describe el flujo de trabajo para la simulación. Cuando es pertinente, se explica la relación con la teoría para enlazar cada paso con los conceptos teóricos abordados en los cursos de Mecánica de Materiales a nivel licenciatura. Durante el desarrollo se identificaron aspectos clave para la ejecución correcta; esos hallazgos se incluyen bajo la etiqueta de "error común" a fin de que, al replicar la simulación se eviten estos errores y se incluyen imágenes para reforzar estos aspectos.

1) Realizar el croquis 2D:

- Propósito: Dibujar cada barra como línea independiente y cada nodo en su intersección.
- Relación con la teoría: Supuestos del método de nodos (número de elementos y nodos deben corresponder).
- Cómo verificarlo: Contar barras y nodos y cotejar con la estructura original.
- Error común: Líneas solapadas, inconexas, juntas faltantes o extra.

2) Asignar la geometría del perfil estructural (Piezas soldadas → miembro estructural):

Propósito: Asignar perfil ISO tubo cuadrado 80×80×5 y generar lista de cortes. Se sugiere generar 3 grupos: Uno con todos los elementos exteriores, como se muestra en la Figura 2. Un segundo grupo con los elementos mostrados en la Figura 3. El tercer grupo con el elemento central FG, como se muestra en la Figura 4. Cuando se tenga un grupo con dos o más elementos, seleccionar "extremo a inglete" dentro de en la opción "aplicar tratamiento de esquinas".

- Cómo verificarlo: Se deben formar 21 elementos.
- Errores comunes: agrupar miembros no continuos lo que lleva a uniones mal definidas o tratar de agrupar miembros que no se tocan dentro de un mismo grupo.

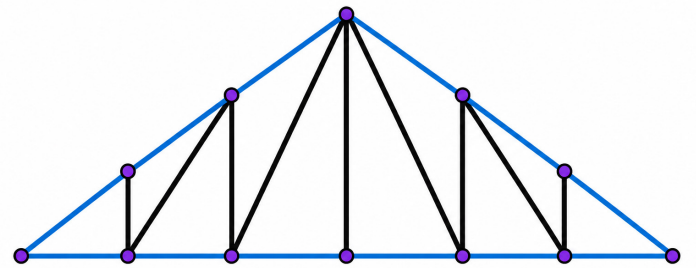


Figura 2. Asignación de miembros estructurales para el grupo 1. Fuente: Elaboración propia

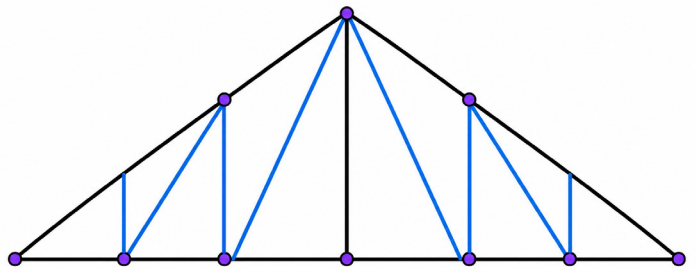


Figura 3. Asignación de miembros estructurales para el grupo 2. Fuente: Elaboración propia

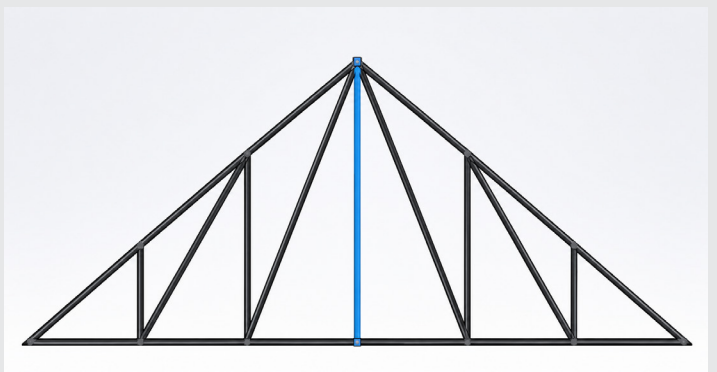


Figura 4. Asignación de miembros estructurales para el grupo 3.
Fuente: Elaboración propia

3) Grupo de juntas:

Propósito: Detectar número de juntas correctas en todas las intersecciones. Crear el estudio estático. Luego editar "Grupo de juntas" y verificar que el número de juntas creado coincida con la estructura bajo estudio. Para este estudio, son 12 juntas, indicadas en nodos de color morado, los cuales deben estar en la intersección de los ejes centroidales de los elementos, tal como se muestra en la Figura 5. Para nuestro estudio, se logró con una distancia "menor que" de 0.15 m.

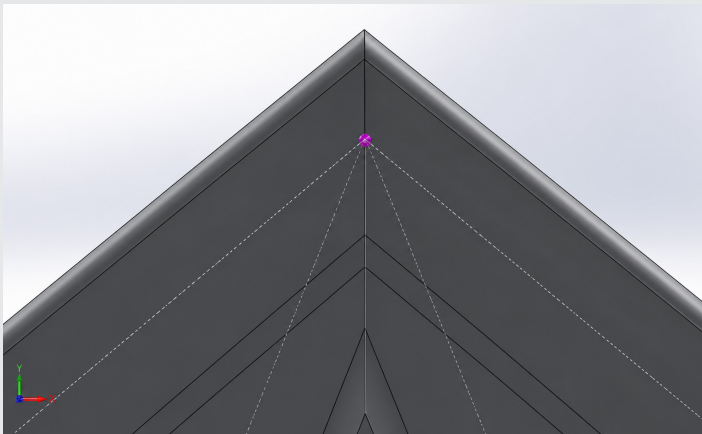


Figura 5. Nodo de la estructura, correctamente ubicado, mostrado en color morado.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 muestra un nodo generado fuera de posición. Este nodo no se generó en la intersección de los ejes centroidales. Esto se debe evitar ya que altera la forma en que se transmiten las cargas y por ende la fuerza resultante en cada elemento.

- Relación con la teoría: Cada nodo del método manual corresponde a una junta.
- Cómo verificarlo: Verificar visualmente la ubicación de cada nodo. Si el número de juntas no coincide con las de la armadura bajo estudio, seleccionar la opción "menor que" e ir reduciendo la distancia hasta obtener el número de juntas correcto. Luego presionar "calcular" y verificar el número de juntas. Verificar que los nodos se forman en la intersección

de los ejes centroidales. En caso de aún no coincidir, repetir el proceso para una distancia menor hasta que se satisfaga esta condición. Otro posible error generado en este paso es el de nodos múltiples, como se muestra en la Figura 7.

- Error común: Tolerancia muy grande/pequeña → nodos múltiples o nodos mal ubicados. Esto hará que el resultado se desvíe de los resultados obtenidos por el método analítico.

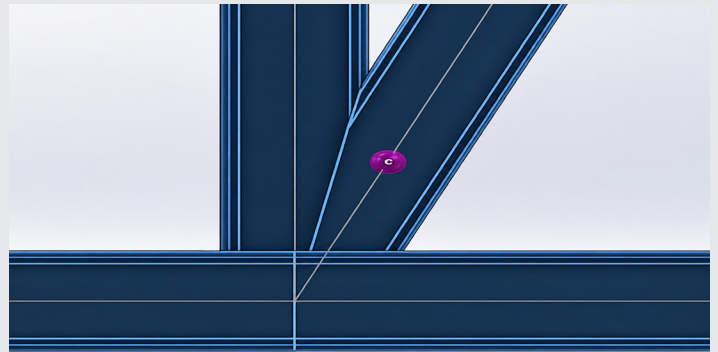


Figura 6. Nodo fuera de posición

Fuente: Elaboración propia

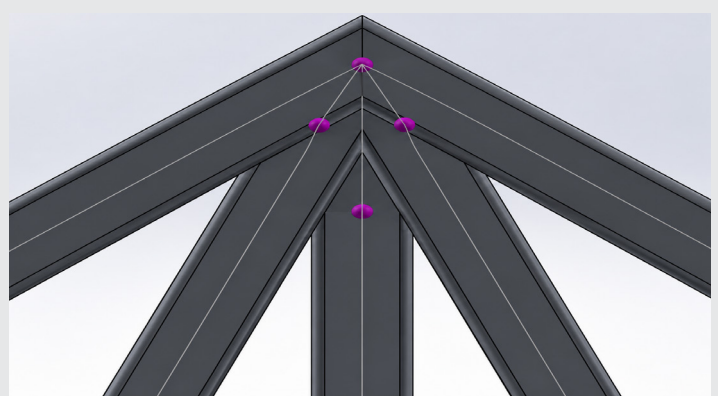


Figura 7. Nodos múltiples.

Fuente: Elaboración propia

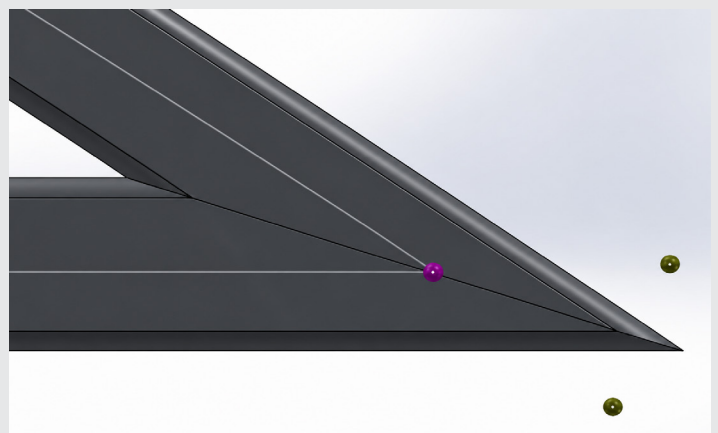


Figura 8. Nodos internos de la malla de la viga, mostrados en color gris.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se generan las juntas, pueden aparecer otros nodos en color gris. Estos nodos, llamados "nodos internos de la malla de viga" son usados por SOLIDWORKS para cálculos de esfuerzos y deformaciones, pero no forman parte de la estructura. En este estudio, aparecen 4 de estos nodos, los cuales sumados a los 12 nodos de la estructura dan un total de 16. Este tipo de nodo se muestra en la Figura 8.

4) Comportamiento tipo armadura: Propósito: Restringir miembros a carga axial (sin flexión ni corte).

- Relación con la teoría: Hipótesis de miembros articulados ($M=0$, $V=0$) para comparar con el cálculo manual.
- Cómo verificarlo: Abrir en lista de cortes (cut list) la carpeta de cada tubo. En cada uno activar "editar definición" y seleccionar la opción de cabeza de armadura. Esto implica que cada elemento trabajará en tensión o compresión, pero no en flexión. Figura 9.

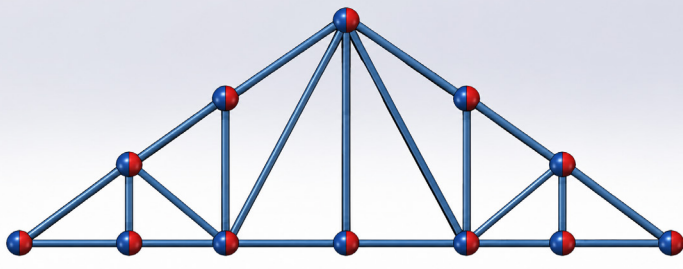


Figura 9. Juntas designadas como cabeza de armadura.
Fuente: Elaboración propia.

5) Material:

- Propósito: asignar ASTM A36 ($E=200$ GPa, $\nu=0.29$, $\sigma_y \approx 250$ MPa) a toda la estructura.
- Relación con la teoría: Permite calcular σ , y FdS comparables con cálculo manual.
- Cómo verificarlo: Revisar Material en árbol del estudio; confirmar propiedades.

6) Condiciones de frontera (apoyos)

- Propósito: Para el apoyo fijo en A, usar un apoyo inamovible, con restricción en los 3 ejes. Para el apoyo de rodillo en L, usar geometría de referencia y dejar sin reacción el eje X. Figura 10
- Relación con la teoría: reproduce reacciones del caso manual.
- Cómo verificarlo: Para el rodillo, usar Geometría de referencia y liberar X. Verificar en Enumerar fuerzas resultantes que las reacciones coinciden con el cálculo manual.
- Error común: Restringir ejes indebidos en L lo que lleva a una sobre restricción. No olvidar que, aunque el croquis es 2D se debe generar el apoyo como 3D.

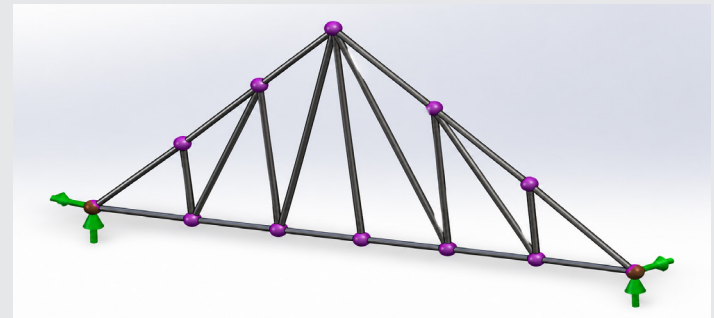


Figura 10. Vista Isométrica de los apoyos
Fuente: Elaboración propia.

7) Cargas:

- Propósito: Aplicar cargas puntuales en juntas (B, D, F, H, $J = 30\ 000$ N en $-Y$; A y L = $15\ 000$ N en $-Y$).
- Relación con la teoría: Cargas concentradas en nodos (armadura ideal).
- Cómo verificarlo: Revisar dirección, magnitud y ubicación de la carga en juntas (no en barras). Error común: aplicar carga en los elementos o nodos que no están bien definidos. Esto induce flexión no deseada.

8) Mallado:

- Propósito: En este caso se crea la malla sin opciones de ajuste.
- Relación con la teoría: Se discretiza cada elemento para aplicación del método del elemento finito.

9) Solver:

- Propósito: Seleccionar en propiedades del estudio el solver Direct Sparse. Este solver privilegia la consistencia de resultados en un problema estático lineal de tamaño pequeño-mediano. En la documentación técnica se indica que los solvers de este tipo son más estables y ofrecen respuestas reproducibles en este tipo de problemas [14]
- Relación con la teoría: Garantiza solución lineal estática estable acorde al modelo.
- Cómo verificarlo: Propiedades del estudio → Solver seleccionado.
- Error común: No cambiar o usar Solver diferente → baja reproducibilidad.

10) Ejecutar el estudio:

- Propósito: Resolver el análisis con los parámetros definidos.
- Relación con la teoría: Obtener F, σ , y reacciones para comparación.
- Cómo verificarlo: Ejecutar el estudio. En el árbol de Resultados, dar clic derecho y seleccionar "Definir trazado de comprobación de convergencia"; debe mostrarse el mensaje "Análisis completado sin problemas de convergencia del solver". Además, se deben generar correctamente los gráficos de resultados. Con estos criterios, la corrida se considera exitosa para comparación con el cálculo manual.
- Error común: Ejecutar con ajustes incompletos → resultados inválidos.

11) Gráficos de resultados:

- Propósito: Generar estos reportes de resultados: 1. Trazado de tensiones (configurar para axial). 2. Factor de seguridad, ajustar la escala entre 0 y 30 dado que el elemento FG está a carga 0 y dará un valor muy alto. 3. Definir diagrama de vigas y configurar a fuerza axial. Este reporte se muestra como "Trazado de módulos cortantes", pero en realidad presenta la fuerza axial en cada elemento.
- Las Figuras 11, 12 y 13 muestran, respectivamente, los resultados para el análisis de tensiones, el factor de seguridad y a manera de ejemplo, las fuerzas en el elemento DF.
- Relación con la teoría: Compara σ y FdS con cálculos manuales.
- Cómo verificarlo: Unidades (SI), tensión axial seleccionada; FdS con multiplicador 1.
- Error común: Mostrar Von Mises en vez de axial en el gráfico de tensiones.

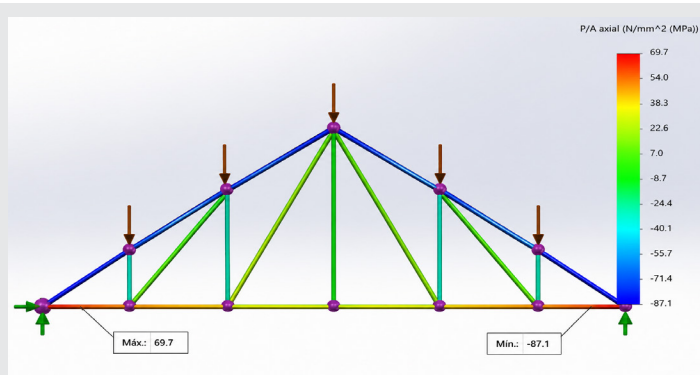


Figura 11. Resultados del estudio de tensiones. Fuente: Elaboración propia.

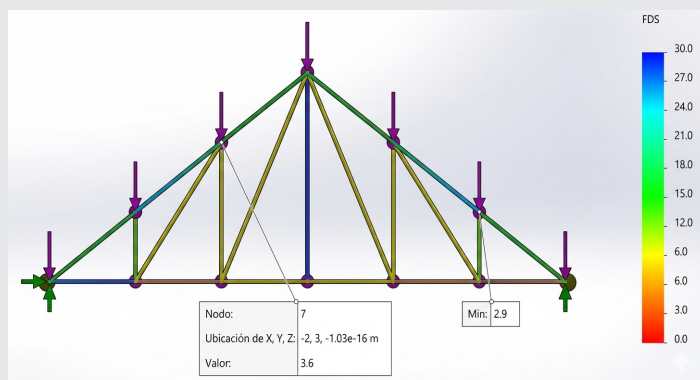


Figura 12. Resultados del estudio para FdS. Fuente: Elaboración propia

12) Fuerza por elemento (enumerar fuerzas de vigas)

- Propósito: En el reporte de "Trazado de módulos cortantes", obtener fuerza axial en cada elemento (tensión/compresión) mediante la opción de identificar valores.
- Relación con la teoría: Corresponde a los valores de F del método de nodos.
- Cómo verificarlo: Identificar valores en cada elemento y signo: La convención de SW es positivo para compresión. La Figura 13 muestra, a manera de ejemplo, la fuerza en el elemento DF.

- Error común: No verificar la convención de signos del software para tensión o compresión.

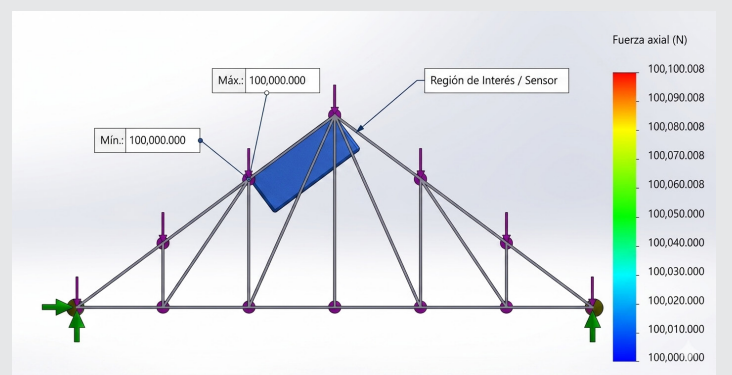


Figura 13. Resultado para la fuerza en el elemento DF. Fuente: Elaboración propia

13) Reacciones:

- Propósito: Listar fuerzas de reacción en A y L.
- Relación con la teoría: Valida el equilibrio global $\Sigma F=0, \Sigma M=0$.
- Cómo verificarlo: Enumerar fuerzas resultantes \rightarrow Seleccionar los nodos de apoyo; comparar con tabla manual. La Figura 14 muestra las reacciones en los apoyos.
- Error común: Plano de referencia mal elegido en L \rightarrow reacción en X indebida.

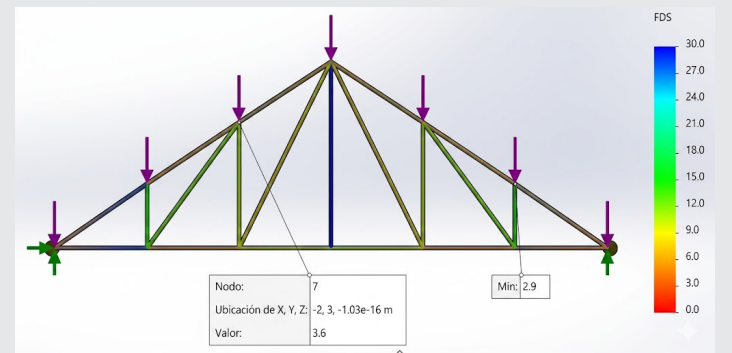


Figura 14. Reacciones en los apoyos Fuente: Elaboración propia.

14) Comparación de resultados y control de calidad:

- Propósito: Comparar tabla manual vs. simulación (reacciones, fuerza por elemento, σ , FdS).
- Criterio de verificación. Se adoptó un error relativo $\leq 1\%$ entre el cálculo manual y la simulación para los resultados seleccionados. Esta elección se basa en ASME V&V 10-2019 (Verification and Validation in Computational Solid Mechanics) [15], que no impone un umbral único, pero requiere documentar métricas cuantitativas de comparación acordes al problema. En un caso lineal con solución analítica como el presente, un porcentaje del 1% se considera aceptable.
- Relación con la teoría: Verifica equivalencia de hipótesis y resultados.

RESULTADOS

Los valores obtenidos mediante el cálculo manual y la simulación en SOLIDWORKS Simulation 2024 coincidieron dentro de la tolerancia numérica para las cuatro salidas evaluadas: reacciones en apoyos, fuerzas axiales por elemento, esfuerzos axiales σ , y factor de seguridad FdS. La diferencia relativa entre ambos enfoques fue $\leq 1.0\%$ en todos los casos con carga distinta de cero, atribuible al redondeo de propiedades geométricas y constantes del material. El elemento FG resultó con fuerza nula ($N = 0$), por lo que no se reporta FdS para ese miembro.

Discusión

La concordancia observada depende de mantener en el modelo de SOLIDWORKS Simulation las mismas hipótesis del análisis manual: conectividad por nodos, miembros articulados, comportamiento axial sin flexión y lectura de resultados axiales. En pruebas preliminares se identificó que ajustes aparentemente menores (configuración de juntas, definición de miembros como truss y selección del tipo de tensión) pueden introducir componentes de flexión y alterar las fuerzas internas reportadas. Por ello, el flujo de trabajo enfatiza los puntos críticos de configuración y un criterio de verificación cuantitativo para asegurar resultados consistentes y replicables.

La Tabla 4 muestra la comparación de los resultados de reacciones en los apoyos entre ambos métodos, donde se muestra que el estudio de simulación no muestra diferencia vs los resultados analíticos.

Tabla 4. Comparación de resultados, reacciones en los apoyos. Método manual vs simulación.

Reacciones en los apoyos			
Apoyo	Reacción axial [kN] método manual	Reacción axial [kN] simulación	% error
A	90.0	90.0	0.0
L	90.0	90.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5 muestra la comparación manual vs. Simulación para las fuerzas axiales en cada elemento.

La Tabla 6 muestra la comparación para el esfuerzo axial. En este caso, las diferencias son mínimas, bastante por debajo del 1.0%, lo cual confirma la validez del flujo sugerido en la simulación.

La Tabla 7 muestra la comparación de resultados para el factor de seguridad. En este caso se ajustó la escala de 0 a 30, ya que el elemento FG, al no presentar cargas, se crea un factor de seguridad "infinito". En este caso el factor de seguridad no aplica.

La métrica empleada para cálculo del error relativo fue la siguiente:

$$\%Error = \frac{|X_{Sim} - X_{Man}|}{|X_{Man}|} \times 100 \quad \text{Ec. (3)}$$

Tabla 5. Comparación de resultados, fuerzas axiales en cada elemento. Método manual vs simulación.

Fuerzas y estado por elemento. Cálculo Manual vs Simulación			
Elemento	Fuerza axial [kN] cálculo manual	Fuerza axial [kN] simulación	% error
AB	125.0	125.0	0.0
AC	100.0	100.0	0.00
BD	125.0	125.0	0.00
BC	30.0	30.0	0.00
CD	36.1	36.1	-0.02
CE	80.0	80.0	0.00
DF	100.0	100.0	0.00
DE	45.0	45.0	0.00
EF	49.2	49.2	-0.01
EG	60.0	60.0	0.00
FG	0.0	0.0	N/A

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Comparación de resultados, esfuerzo normal en cada elemento. Método manual vs simulación.

Esfuerzo normal. Cálculo manual vs simulación			
Elemento	Esfuerzo [MPa] cálculo manual	Esfuerzo [MPa] simulación	% error
AB	87.1	87.1	0.0
AC	69.7	69.7	-0.06
BD	87.1	87.1	-0.03
BC	20.9	20.9	-0.01
CD	25.1	25.1	0.04
CE	55.7	55.7	0.05
DF	69.7	69.7	-0.06
DE	31.4	31.3	0.14
EF	34.3	34.3	0.00
EG	41.8	41.8	-0.01
FG	0.0	0.0	N/A

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Comparación de resultados, factor de seguridad en cada elemento. Método manual vs simulación.

Factor de Seguridad. Cálculo manual vs simulación			
Elemento	Factor de seguridad [adimensional]. Cálculo manual	Factor de seguridad [adimensional]. Simulación	% error
AB	2.87	2.87	0.04
AC	3.59	3.59	-0.03
BD	2.87	2.87	0.04
BC	11.96	11.96	0.03
CD	9.96	9.95	0.06
CE	4.49	4.49	-0.08
DF	3.59	3.59	-0.03
DE	7.98	7.98	-0.05
EF	7.29	7.29	-0.02
EG	5.98	5.98	0.03
FG	N/A	N/A	N/A

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El flujo de trabajo propuesto permite reproducir en SOLIDWORKS Simulation 2024 los resultados de los métodos de nodos y/o secciones con desviaciones ≤ 1.0 % en las salidas verificadas (reacciones, fuerza en cada elemento, esfuerzo normal, FdS).

Es fundamental comprender los principios de Estática y Mecánica de Materiales que se están configurando en el estudio. De la misma manera, entender el funcionamiento del método de elementos finitos a través del módulo de simulación del software que se esté utilizando, en este caso SOLIDWORKS 2024. De lo contrario, solo se aprendería a operar el software sin una comprensión real de los fundamentos teóricos que sustentan los resultados.

Con el mismo procedimiento pueden abordarse estructuras con más elementos sin perder trazabilidad de resultados; la simulación acorta tiempos, reduce errores de planteamiento y prepara al estudiantado para cursos posteriores con simulación asistida por computadora.

El flujo documentado es replicable y auditable (pasos, parámetros y verificación), lo que favorece su uso didáctico en cursos de Estática y Mecánica de Materiales. Por todo lo anterior, se considera que esta propuesta es valiosa para su implementación en el aula para las asignaturas donde se imparten estos temas, ya que facilitan tanto al docente y al alumno una mejor comprensión de los aspectos teóricos del tema y su aplicación en contextos más complejos con la ayuda de la simulación.

Limitaciones: El caso analizado asume comportamiento lineal elástico, miembros idealizados y cargas estáticas; por ello, los resultados no deben extrapolarse a condiciones no lineales, conexiones semirrígidas o efectos de pandeo sin un estudio específico.

Trabajo futuro. Se propone aplicar el mismo flujo a armaduras con mayor número de miembros y a casos con distintas condiciones de apoyo y carga, así como incorporar una validación pedagógica cuantitativa para documentar el impacto didáctico del recurso.

BIBLIOGRAFÍA

[1] F. P. Beer, E. R. Johnston y D. F. Mazurek, *Mecánica vectorial para ingenieros: Estática*, 11^a ed. México: McGraw-Hill, 2017.

[2] R. L. Mott, *Resistencia de Materiales*, 5^a ed. México: Pearson Education, 2009.

[3] F. P. Beer y E. R. Johnston, *Mecánica de Materiales*, 7^a ed. México: McGraw-Hill Education, 2018.

[4] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, 4^a ed. México: Pearson Education, 2006.

[5] S. S. Nudehi y J. R. Steffen, *Analysis of Machine Elements Using Solidworks Simulation 2024*, Mission, KS: SDC Publications, junio 11, 2024.

[6] R. V. Petrova, *Introduction to Static Analysis Using Solidworks Simulation*, CRC Press, 2014.

[7] S. Tickoo, *Solidworks Simulation 2024: A Tutorial Approach*, 4^a ed. U.S.A.: CADCIM Technologies, 2024.

[8] F. A. Martínez-Marín, A. Medina-Lozano, I. A. Cantú-Munguía y M. L. Martínez-Mendoza, "Simulación en la Ingeniería," *Revista de Simulación y Laboratorio*, vol. 6, no. 18, pp. 1-6, 2019.

[9] Y. M. A. Almashani, A. A. Alamri, M. M. F. Al-Ghassani y M. V. Kulkarni, "Stress analysis using Solidworks Simulation," *EPRA International Journal of Multidisciplinary Research*, vol. 9, no. 9, Sep. 2023. doi: 10.36713/epra14295

[10] J. M. Gutiérrez Villarreal, A. Luna Bracamontes, A. Sepúlveda Romo y J. F. Alemán Escobedo, "Simulación de esfuerzos mecánicos en materiales para la ingeniería," *EPITEMUS. Revista de Estudios Interdisciplinarios*, vol. 18, no. 36, 2024. doi: 10.36790/epistemus.v18i36.314

[11] E. E. Montijo Valenzuela y M. P. Martínez Rubio, "Cálculo de esfuerzos mediante simulación con elementos finitos: una herramienta para implementarse en ingeniería," *Pro Sciences: Revista de Pro-*

ducción, *Ciencias e Investigación*, vol. 4, no. 34, pp. 70-78, 2020. doi: 10.29018/issn.2588-1000vo-14iss34.2020pp70-78.

[12] Widiyanti, P. Puspitasari y A. Suyetno, "The development of instructional materials mechanics of materials using Solidworks Simulation software," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1778, p. 030058, 2016. doi: 10.1063/1.4965792.

[13] J. R. E. Baltazar Ramírez, D. Murguía Pérez, E. Cárdenas Zanabria, L. G. González Vázquez, J. B. Villalvazo Rivera y J. D. Cárdenas González, "Solidworks: una alternativa en el aprendizaje para analizar la flexión en vigas," *Revista INCAING*, año 4, no. 3, pp. 71-80, sept.-oct. 2023.

[14] SOLIDWORKS Help, "Solvers de análisis," 2024/2026. (comparativa Direct Sparse vs FFEPlus, memoria/escala).

[15] ASME, *Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics (ASME V&V 10-2019)*. New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers, 2020.





Mecánica *de* Materiales

Ingeniantes

Análisis termo-mecánico de bloques de adobe adicionado con bagazo de caña y café

RESUMEN: En la actualidad uno de los grandes desafíos de la arquitectura y la construcción es el desarrollo de materiales sostenibles ambiental y económicamente, que posean las funciones físicas necesarias de resistencia estructural, y que puedan proveer un ambiente térmico adecuado. A partir de los Objetivos para el Desarrollo Sustentable de la ONU, principalmente el 12, "Consumo y la producción responsable".

En el presente trabajo, se analiza el uso del bagazo de caña y café, considerados desperdicio orgánico, con el fin de aplicarse a elementos de construcción basados en tierra. La tierra, como material de construcción, ofrece beneficios como su disponibilidad local, baja huella de carbono y capacidad de regulación térmica, aunque su uso ha sido subestimado en las prácticas constructivas modernas.

El método utilizado fue el análisis de los desechos con mayor presencia dentro de la región considerando su previa utilización en estudios similares, proporcionando la mezcla de tierra y las fibras en distintas proporciones y después fueron sometidas a pruebas de compresión y conductividad térmica.

La variación de los materiales a diferentes proporciones de estos agregados a la tierra genera cambios en sus propiedades térmicas y mecánicas. Para un 5 % de bagazo de caña y café se presentó un incremento a la resistencia a la compresión, mientras que un 15 % en proporción de estos agregados genera un mejor aislamiento térmico.

PALABRAS CLAVE: Adobe, bagazo de caña, bagazo de café, Resistencia a la compresión, conductividad térmica.



Colaboración

Luis Mateo Chavarín Verduzco; Ximena Trejo Contreras; Dominga Zuleica Chávez Pérez; José Ricardo Moreno Peña; Jorge Armando Ojeda Sánchez, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 10 de marzo de 2025
Fecha de aceptación: 29 de mayo de 2026

Autor de Correspondencia: Dominga Zuleica Chávez Pérez

ABSTRACT: Nowadays, one of the major challenges in architecture and construction is the development of materials that are environmentally and economically sustainable, in addition to fulfilling necessary physical functions such as structural strength and providing adequate thermal comfort. Based on the UN's Sustainable Development Goals, particularly responsible consumption and production, there is a growing interest in reviving traditional techniques such as the use of earth in construction, which has been overshadowed by industrialized materials. Earth, as a construction material, offers benefits such as local availability, low carbon footprint, and thermal regulation capabilities, although its use has been underestimated in modern construction practices. In this study, the use of sugarcane bagasse, considered organic waste, coffee waste, and earth is analyzed for application in earth-based construction elements. The method used involved analyzing the most prevalent waste materials in the region and their prior use in similar studies, creating mixtures of earth and fibers in different proportions, which were then subjected to compression and thermal conductivity tests.

The variation of materials at different proportions of these additives to the earth results in changes in their thermal and mechanical properties. For a 5 % proportion of sugarcane bagasse and coffee waste, an increase in compressive strength was observed, while a 15 % proportion of these additives provided better thermal insulation.

KEYWORDS: Adobe, sugarcane bagasse, coffee husk, compressive strength, thermal conductivity.

INTRODUCCIÓN

La investigación y desarrollo de materiales para la construcción que ayuden a mejorar las condiciones térmicas interiores, así como la resistencia mecánica proporcionando mayor seguridad estructural, además de reducir las emisiones de CO₂ durante su fabricación es una de las alternativas para reducir las emisiones que produce

la industria de la construcción que equivalen alrededor del 38 % de CO₂, anuales [1] de los cuales la fabricación de cemento produce un 7 % de CO₂, el acero 7.2 % CO₂, y de vidrio entre el 7-9 % CO₂ de las emisiones totales [2].

En investigaciones recientes se ha demostrado como la incorporación de desechos orgánicos provenientes de la agricultura como lo son el bagazo de caña y café puede aumentar algunas propiedades de los materiales, ya sea del concreto o del adobe.

Se ha identificado que al agregar bagazo de caña en bloques de adobe en ciertas proporciones aumenta la resistencia a la compresión y a la elasticidad [3], de igual manera la incorporación de este material a revocos de tierra en proporciones de 5 % y 10 % se disminuye la conductividad térmica [4].

En otros estudios se ha descubierto que la incorporación de ceniza de bagazo de caña mejora la resistencia del concreto en pequeños porcentajes que van del 5 al 15 % [5].

En el caso del bagazo de café sometido a un proceso para convertirlo en carbón activado y su incorporación al concreto en una proporción del 0.5 % aumenta un 48 % de la resistencia a los 7 días, mientras que al agregar 1.5 % se alcanza una resistencia del 27 % a los 28 días [6]. En otro estudio se demostró que al someter al bagazo de café a un proceso de pirólisis la resistencia a la compresión aumenta [7].

Por los hallazgos reportados, el uso del bagazo de caña y el café, como desperdicio orgánico, a proporciones controladas, mezclados con tierra, pueda obtenerse materia prima con propiedades aumentadas, tales como la resistencia a la compresión y una capacidad de aislamiento térmico.

En el presente trabajo, se utilizó dichos desperdicios orgánicos, para generar bloques de prueba, para determinar su comportamiento mecánico (resistencia) y propiedades térmicas (conductividad térmica), mediante equipo especializado, con el objetivo de determinar la influencia de estos agregados, para su uso con fines de construcción.

MATERIAL Y MÉTODOS

Debido a la producción agrícola de caña de azúcar y café cereza en el occidente de México, donde Colima representa la producción de 2,905.07 hectáreas de café cereza y 16,088.24 hectáreas de caña de azúcar [8].

Recolección de los materiales

El bagazo de café: se recogió del uso diario y de algunos negocios locales, al ser una muestra pequeña la cantidad se recolectó en un mes y medio como se

muestra en la Figura 1. Limitando el mismo al café local producido en el Municipio de Comala, que produce alrededor de 1,398.00 de hectáreas de café cereza.



Figura 1. Recolección de bagazo de café.
Fuente: Elaboración propia.

Bagazo de caña: El municipio de Cuauhtémoc, Colima, produce alrededor de 9,856.00 ha de caña de azúcar. El bagazo de caña se recolectó directamente de ingenio de Quesería, Cuauhtémoc como se aprecia en la siguiente Figura 2.



Figura 2. Recolección de bagazo de caña directamente del ingenio de Quesería.
Fuente: Elaboración propia.

La tierra: en el estado de Colima existe una diversidad de tipos de suelo aptos para los distintos sistemas constructivos con tierra. El mejor suelo para la fabricación de adobe es de Comala y Villa de Álvarez, ya que su porcentaje de arena, limo y arcilla son los adecuados para la fabricación de adobe [9]. El material se recolectó de una fábrica de ladrillo rojo, por lo cual ya viene limpio sin ningún tipo de materia orgánica, como hojas, ramas, semillas. En la Figura 3, se muestra la ubicación de la fábrica de ladrillos.

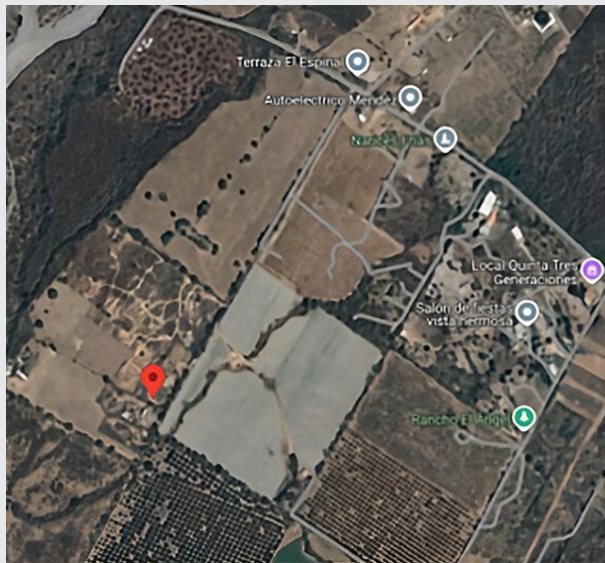


Figura 3. Ubicación de la fábrica de ladrillo.
Fuente: Recuperado de Google Maps 2024.

Preparación de los materiales

Curado del bagazo de café: una vez recolectada una cantidad considerable del café se lavó con agua destilada para eliminar los residuos y se dejó secar durante las 10 hora diarias y el resto a la sombra para evitar exceso de humedad ambiental durante 15 días, como se ve en la Figura 5 (a).

Curado del bagazo de caña: se lavó con agua y jabón neutro para retirar el exceso de azúcares y otras impurezas, se dejó secar durante 10 horas de luz durante el resto a la sombra para evitar la absorción de humedad nocturna, este proceso se repitió durante 15 días, una vez culminado el proceso de secado, se cortó con tijeras en segmentos de 2.5 cm. Procurando mantener el mismo grosor, como se ve en la Figura 4 (b).

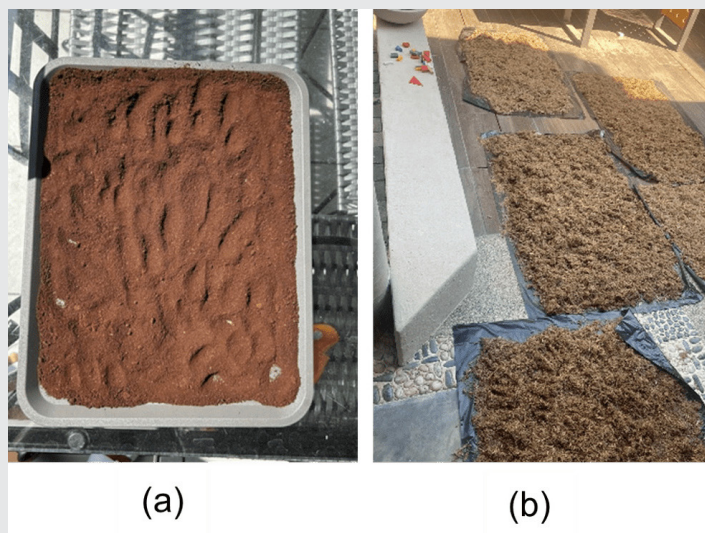


Figura 4. Curado del bagazo de café (a) y del bagazo de caña (b).
Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que para efectos de esta investigación el bagazo de caña y café solo se incorporaron a la tierra con un proceso de lavado y secado al sol durante las horas de luz por un periodo de 15 días, retomando los procesos empíricos de la incorporación de material vegetal a la fabricación de adobe, con la finalidad de que estos materiales puedan ser replicables.

Proporción de las mezclas: para la preparación de las muestras se tomó como referencia los datos de las investigaciones previas donde de acuerdo con el peso volumétrico de la tierra, por cada 200 g de la mima de agrego 1 %. 5 % y 10 % de bagazo de caña [3-4], sin embargo, para esta investigación se hicieron algunas modificaciones, se consideró un peso volumétrico neto de la tierra al cual se le agregaría el porcentaje de los agregados naturales al 1%. 5%. 10% y 15% en total, es decir la mitad de cada uno de los porcentajes corresponde al porcentaje neto agregado a la mezcla.

El peso volumétrico de la tierra es igual a 1,211 g. El del bagazo de caña es de 122 g y el del bagazo de café de 305 g. en la Tabla 1, se muestra las cantidades de tierra y agregados utilizados para cada proporción. La nomenclatura T, corresponde a la tierra, BA al bagazo de caña y BC al bagazo de café.

Tabla 1. Porcentajes de las mezclas.

%	Cantidad de muestras	Material por muestra		
		T(g)	BA(g)	BC(g)
0%	4	1,211	-	-
1%	4	1,209	0.61	1.52
5%	4	1,200	3.05	7.62
10%	4	1,190	6.1	15.25
15%	4	1,179	9.15	22.87

Fuente: Elaboración propia.

Fabricación de las probetas

Se fabricaron un total de 4 probetas por mezcla con un total de 20 bloques de adobe, para ello fue necesario el apoyo de una báscula, un molde de madera con capacidad de 8 bloques, cada cavidad tiene una dimensión de 10 x 10 x 10 cm, dimisión recomendada para ensayos mecánicos de especímenes de tierra, según lo mencionado por la normas Peruana E. 080 [11], como se ve en la Figura 5, cubetas para preparar las mezclas, recipientes para separar el bagazo, cuchara de albañil, varilla para remover la mezcla.

Primero se pesó el material por cada una de las muestras de acuerdo con la Tabla 1. Posteriormente se mezcla en seco el material para obtener una mezcla homogénea, después se incorporaron 150 ml de agua, se mezcló nuevamente y se vertió la mezcla al molde previamente recubierto con aceite requemado, con la ayuda de la varilla se vibra la mezcla para evitar huecos,

una vez listas las muestras, se dejaron reposar durante 2 horas al sol antes de desmoldar, en la Figura 6 se observan los pasos para la fabricación de las probetas de cien por ciento de tierra. Se limpio correctamente el molde, se engraso nuevamente y se repitió el procedimiento hasta obtener todas las muestras.



Figura 5. Molde para de madera para la fabricación de los blocks.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Fabricación de las probetas de tierra.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizada la producción de los bloques se dejaron secar durante 10 horas diarias al sol por las noches se resguardaron bajo techo para evitar exceso de humedad durante 15 días, como se ve en la Figura 7.



Figura 7. Muestras de adobe, bagazo de caña y café.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis mecánico

La de resistencia a la compresión y deformación se realizó en el laboratorio de mecatrónica en las instalaciones del Instituto tecnológico de Colima. Para ello se utilizó la máquina para esfuerzos y deformaciones Shimadzu UH-500KNI [10] que se ve en la Figura 8.



Figura 8. Máquina para esfuerzos y deformación Shimadzu UH-500KNI.

Fuente: Elaboración propia.

El ensayo se realizó siguiendo las recomendaciones de la norma Peruana E. 080 [11] y la ASTM E8M [12]. El esfuerzo normal aplicado por el equipo se describe en la ecuación 1. Donde; σ es el esfuerzo normal, F, es la fuerza aplicada que se divide entre el área de la superficie de contacto A, en este caso de 100 cm².

$$\sigma = F/A \quad \text{Ec. (1)}$$

Análisis térmico

El análisis térmico se llevó a cabo en el laboratorio de Arquitectura de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Colima, ubicado en Coquimatlán, Colima. Se utilizó el analizador de propiedades térmicas, KD2 Pro [13], que mediante el sensor KS-1, se tomaron mediciones de la conductividad y resistividad térmica de materiales sólidos. El dispositivo se puede apreciar en la Figura 9. La medición de dichas propiedades requiere se realice una perforación en el centro de cada una de las muestras, el sensor tiene una aguja de un diámetro de 1.2 mm y una longitud de 60 mm. Se tomaron tres muestras por cada una de las probetas.



Figura 9. KD2 Pro.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

En la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos por cada uno de los porcentajes aplicando el esfuerzo normal (σ) en kg y la deformación (ϵ) en mm, así como los promedios de ambos resultados.

Tabla 2. Resultados mecánicos.

Porcentajes	Fuerza (kg)	Esfuerzo normal	Deformación (ϵ)	Promedio σ	Promedio (ϵ)	Desviación estándar del esfuerzo normal (σ)
0%	2,355	23.55	1.70	23.25	2.37	2.81
	2,030	20.3	2.00			
	2,590	25.9	3.40			
1%	2,386	23.86	3.40	25.56	3.23	3.30
	2,936	29.36	2.30			
	2,345	23.45	4.00			
5%	3,120	31.2	0.80	29.34	1.43	1.32
	2,855	28.55	1.80			
	2,978	29.78	1.70			
10%	2,416	24.16	3.50	24.50	2.67	0.56
	2,549	25.49	2.20			
	2,386	23.86	2.30			
15%	1,305	13.05	1.40	14.99	2.10	4.26
	1,203	12.03	3.00			
	1,988	19.88	1.90			

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10, se observa el comportamiento por cada una de las muestras, en el caso de la muestra testigo de los bloques de cien por ciento de tierra el resultado más bajo de los esfuerzos fue de 20.3 kg/cm², y el más alto de 25.9 kg/cm², en el caso de los bloques con 1% de bagazo de caña y café el resultado más bajo es de 23.45 kg/cm², mientras que el más alto es de 29.36 kg/cm², en el caso de las muestras de 5 % el resultado más bajo es de 28.55 kg/cm², mientras que el más alto es de 32.2 kg/cm², para las muestras de diez por ciento el resultado los resultados rondan entre 23.86 kg/cm² y 25.49 kg/cm², finalmente, para las muestras de quince el resultado más bajo es de 12.03 kg/cm² y el más alto 19.05 kg/cm².

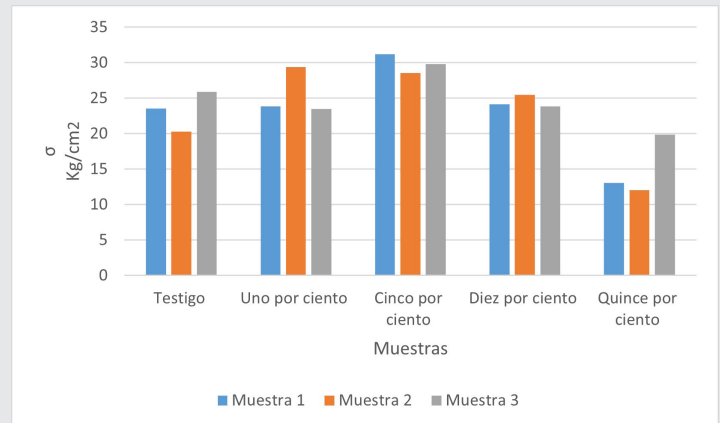


Figura 10. Grafica de la comparación del comportamiento a la compresión de las distintas proporciones de tierra y bagazo.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 10, las muestras que obtuvieron el mejor comportamiento son las de 5 % de bagazo de caña y café, incluso por encima de las probetas de 100 % de tierra, seguidas por las muestras de 1 %, posteriormente, las muestras de 10 %, finalmente, las muestras con 15 % de bagazo son las que obtuvieron los resultados menos favorables, incluso por debajo de las muestras de 100 % de tierra.

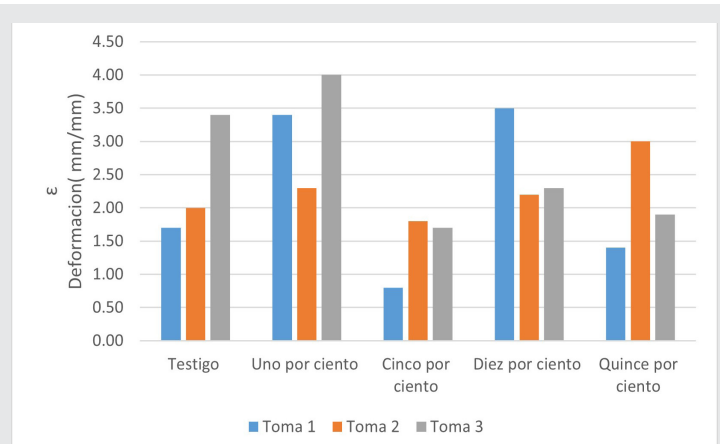


Figura 11. Grafica de la deformación en los bloques de las distintas proporciones de tierra y bagazo.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11, se muestra la deformación en mm de las muestras al momento de aplicar la fuerza, para los bloques de cien por ciento de tierra la deformación oscila entre los 1.7 a los 3.50 mm, para las muestras de 1 % la deformación va de los 2.3 a los 4.0 mm, para las muestras de 5 % es de 0.8 a 1.8 mm, en el caso de las muestras 10 % la variación es entre 2.2 a 3.5 mm, finalmente, para las muestras de 15 % se tiene una deformación entre 1.4 a 3.0 mm.

En el caso de la conductividad térmica (K) los valores obtenidos se observan en la Tabla 3, donde se obtuvo un promedio de 0.46 W/mK, para las muestras de 0 %, de 0.44 W/mK para las muestras de 1 %, de 0.49 W/mK para las muestras de 5 %, de 0.46 W/mK para las de 10 % y 0.27 W/mK para las de 15 %.

Tabla 3. Conductividad térmica (K).

0%	1%	5%	10%	15%
0.46	0.44	0.49	0.46	0.27

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, para un mejor aislamiento térmico la mezcla de 15 % obtuvo una menor conductividad térmica con 0.27 W/mK. Cuando un material cuenta con una conductividad térmica alta facilita el paso de calor, mientras que una conductividad térmica baja disminuye la capacidad para el paso de calor.

CONCLUSIONES

Cuando se agrega una cantidad moderada y proporcional de bagazo de caña y café, en relación con el peso volumétrico de la tierra, se mejora la resistencia a la compresión de las muestras en comparación con las compuestas únicamente de tierra. En particular, las muestras con un 5 % de bagazo de caña y café, y un 95 % de tierra, mostraron el mejor comportamiento tanto en resistencia a la compresión como en deformación. No obstante, también se observó que es aceptable incluir un porcentaje menor (1 %) o mayor (10 %) de bagazo. Sin embargo, cuando la proporción de bagazo es demasiado alta, la resistencia a la compresión disminuye significativamente, incluso por debajo de las muestras que contienen solo tierra.

En cuanto a la conductividad térmica, se encontró que, al aumentar la cantidad de bagazo, las muestras presentan mejores propiedades como aislante térmico que equivale al 15 % del bagazo de caña y café y el 85 % de tierra.

Entonces si se requiere de un material con un buen comportamiento mecánico se recomienda el uso 5 % de bagazo de caña y café, si por el contrario lo que se desea es un material con baja conductividad térmica, se recomienda el uso de 15 % de bagazo de caña y café y el 85 % de tierra.

Aunque es posible trabajar con proporciones mayores (10 %), debe tenerse en cuenta que una cantidad excesiva de bagazo disminuye significativamente la resistencia a la compresión. Por ello, se sugiere realizar ajustes cuidadosos en las proporciones, dependiendo de las prioridades del proyecto (como aislamiento térmico o capacidad de carga).

AGRADECIMIENTOS

A los encargados del laboratorio de mecatrónica del Tecnológico Nacional de México, campus Colima por el apoyo otorgado para realizar las pruebas mecánicas. Al Laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad de Colima por brindar las facilidades necesarias para la ejecución de las pruebas térmicas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] United Nations Environment Programme. (2024). 2023 Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations -Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. United Nations Environment Programme. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>

[2] United Nations. (2023). *Building Materials and the Climate: Constructing a New Future*.

[3] Robles, A., Arceo, S., Moreno, J. R., Chávez, D. Z., & Ojeda, J. A. (2021). Análisis de la resistencia mecánica ante compresión de bloques de adobe. 1(2),54-59.

[4] Cano-Martínez, M. N., Ramos-Venegas, P., Cabrera-Macedo, A., & Ojeda-Sánchez, J. A. (2024). Efecto en las propiedades térmicas de revoques de tierra estabilizados con fibras de bagazo de caña. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 19(35), 79. <https://doi.org/10.36677/legado.v19i35.20514>.

[5] Quito, S., Macías, K., & Guerra, J. (2022). Ceniza del bagazo de caña de azúcar para mejorar la resistividad y resistencia del hormigón. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*. 5(10). 5-18.

[6] Na, S., Lee, S., & Youn, S. (2021). Experiment on Activated Carbon Manufactured from Waste Coffee Grounds on the Compressive Strength of Cement Mortars. *Symmetry*, 13(4), 619.

[7] Roychand, R., Kilmartin-Lynch, S., Saberian, M., Li, J., Zhang, G., & Li, C. Q. (2023). Transforming spent coffee grounds into a valuable resource for the enhancement of concrete strength. *Journal of Cleaner Production*, 419.

[8] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierre-agricola/>

[9] Pérez, D. Z. C., Peña, J. R. M., Ochoa, M. N. C., Arellano, J. F. N., Solorsano, L. A. G., & Diaz, S. A. (2022). Caracterización de los suelos del estado de Colima para la construcción con tierra mediante pruebas de campo.14(2).336-363.

[10] SHIMADZU. (2015). Fixed Compression Plates. 12 de mayo de 2021 de SHIMADZU sitio web: https://www.ssi.shimadzu.com/sites/ssi.shimadzu.com/files/test/accessory/compression/n9j25k0000j-tvra-att/C224-E100A_FixedCompressionPlates.pdf.

[11] Ministerio De Vivienda, Construcción Y Saneamiento. (2017). Norma E.080 Diseño Y Construcción Con Tierra Reforzada. chrome-extension://efaid-nbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://cdn-web.construccion.org/normas/rne2012/rne2006/files/titulo3/02_E/E_080.pdf

[12] Kardak, A. A., & Sinclair, G. B. (2020). Stress Concentration Factors for ASTM E8/E8M-16a Standard Round Specimens for Tension Testing. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(1), 711-719.

[13] Decagon Devices (2013), KD2 pro - Thermal Properties Analyzer: Owner Manual.



Ingeniantes®