

ISSN: 3061-7049



ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE DESARROLLO

ALDESER

SUSTENTABLE Y ENERGÍAS RENOVABLES

**TENDENCIAS EN ENERGÍAS
RENOVABLES Y SUSTENTABILIDAD**

VOL. 5 NO. 1, FEBRERO 2026

TERYS

Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad

Vol. 5 Núm. 1 (2026)

Publicado: 25 de enero de 2026

Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad, Vol. 5, No. 1, Febrero 2026, es una publicación anual, editada y publicada por la Asociación Latinoamericana de Desarrollo Sustentable y Energías Renovables A.C. (ALDESER), Sur 4 No. 270, Colonia Centro, C.P. 94300, Orizaba, Veracruz, Mexico, Tel. 2722372285, página web: www.cidser.org/revista, correo electrónico: secretariat@aldeser.org.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2025-070916283700-102, ISSN: 3061-7049, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR, Mexico). Responsable de la última actualización de este número: Andrea Alvarado Vallejo. Fecha de última modificación, 16 de febrero de 2026.

Los artículos publicados en la revista están sujetos a revisión por pares y su contenido es responsabilidad exclusiva del autor, sin que ello implique necesariamente que refleje el punto de vista de la Asociación o del editor.

Tabla de Contenido

La importancia del monitoreo en la optimización energética de un sistema de bombeo en una unidad académica del IPN	1-8
Carlos Sánchez-Ramos, Gustavo Gutiérrez-Sánchez, David Jiménez-Rodríguez	
Uso de bacterias púrpura no sulfurosas en la remoción de sulfuro de hidrógeno para la limpieza del biogás producido por digestión anaerobia	9-15
Sergio Cisneros de la Cueva, Cecilia Lizeth Álvarez Guzmán, Francisco Javier Zavala Díaz de la Serna, Rosario Peralta Pérez	
Uso de mango criollo (<i>Anacardiaceae</i>) como alternativa para elaborar productos alimenticios y biofertilizante en el Estado de Campeche	16-23
Asteria Narváez-García, Celia Verónica Blanco-Cornelio, Yunuen Canedo-López, Juan Carlos Robles-Heredia	
Biosorción de verde de malaquita en soluciones acuosas por biomasa inactiva de <i>Bacillus thuringiensis</i> HD-181	24-32
Adrian G. Rodríguez-Villarreal, Luz A. Hernández-Martínez, Guadalupe Rojas-Verde, Katiushka Arévalo-Niño, Verónica Almaguer-Cantú	
Estudio termodinámico de un ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto con cinco disoluciones diferentes	33-39
Cristofer Uriel Torres-Rodríguez, Iván Hernández-Pérez, Manuel Adolfo Custodio-Barragán, Luis Enrique Angeles-Montero	
Viabilidad técnica y económica de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado en Jalpa de Méndez, Tabasco	40-46
Kevin S. Olán-Rueda, Daniel A. Córdova-Chablé, Moisés A. Petriz-Prieto, Esveidi M. Valdovinos-García	
Optimización de procesos operativos mediante PERT para la mejora en eficiencia y reducción de costos en servicios petroleros	47-52
Lizbeth Yanareli Rodríguez-Palma, Moisés Abraham Petriz-Prieto, José Castro-Baeza, Esveidi Montserrat Valdovinos-García	
Termosolaridad Pasiva: un potencial marginado	53-59
Luis Gerardo Frausto Torres	
Diseño pasivo y propiedades ópticas: claves para la reducción de la carga térmica en viviendas de climas cálidos subhúmedos	60-70
Jordy Jose Alvarado-Pacheco, Antonio José Cantún-May, Román Alejandro Canul-Turriza, Oscar de Jesús May-Tzuc	
Producción de bioestimulantes de crecimiento de especies de uso forestal y comercial a partir del proceso de biotransformación de granos gastados de cerveza artesanal con <i>Lactobacillus rhamnosus</i>	71-76
Phoebe Sabrina Rodríguez-Ortega, Joaquín Estrada-García, Alejandro Alvarado-Lassman, Juan Manuel Méndez-Contreras	
Las mujeres y la gestión de residuos sólidos urbanos en las viviendas: un caso de estudio en la Zona Metropolitana de Oaxaca	77-85
Isis Neftaly Martínez Morales, Iris Margarita Pérez Palacios	
Co-carbonización hidrotérmica de cascarilla de arroz y digestato para generar agua de proceso con potencial fertilizante	86-95

Sandra Janeth Salgado-Serrano, Juan Manuel Méndez-Contreras, Alejandro Alvarado-Lassman, Norma Alejandra Vallejo-Cantú

Avances en el modelado y simulación de procesos de biometanización aplicados a las aguas residuales de la industria láctea **96-104**

Alan-Jair Gamboa-Escobar, Carlos-Manuel Astorga-Zaragoza, Yurika Toledo-Sánchez, Oswaldo Guzmán-López, Tomás-Eduardo Rodríguez-Ramírez

Disminución de la temperatura de sellado en películas de polietileno modificadas con acrílicos, ahorro de energía **105-109**

Ana Beatriz Morales Cepeda, Claudia Esmeralda Ramos-Galvan, Anjuli Hernández Martínez

Valorización de lodos residuales avícolas mediante procesos anaerobios con *L. plantarum* para la obtención de biomásas con potencial de consumo animal **110-118**

Alondra Sanchez-Solano, Joaquín Estrada-García, Roger Emmanuel Sales-Pérez, Erik Samuel Rosas-Mendoza, Juan Manuel Méndez-Contreras

Microplásticos en el medio ambiente y separadores ciclónicos como alternativa de mitigación. Una revisión **119-129**

Cecilia Ortiz-Alvarez, Esperanza Rodríguez-Morales, Osvaldo Rubio-López, Ana Laura Martínez-Hernández

Diseño de controlador de techo móvil para reducir la ganancia de calor y mejorar el confort **130-137**

Jaziel Almeida de la Cruz-Jiménez, Luis Enrique Angeles-Montero, Iván Hernández-Pérez, Manuel Adolfo Custodio-Barragán, Oscar Rafael Camacho-Cano

Parámetros de la función de Weibull para la región sur de Tamaulipas, México **138-142**

Alicia Yarely Castillo-Medellín, Jorge Ramírez-Muñoz, Valaur Ekbalam Márquez Baños, Román Guadarrama-Pérez

Reducción de cromo hexavalente usando una película de Nanocelulosa de Candelilla-FeO₃ sobre un electrodo Au **143-146**

Ana Beatriz Morales-Cepeda, Claudia Esmeralda Ramos-Galván, Elda Elizabeth Villalobos-Neri, Daniela García-Castelán

Efecto de fitohormonas en la producción de biomasa, pigmentos, y proteínas por *Scenedesmus obliquus* cultivada en medio Bold Basal Modificado (BBM) **147-151**

Brenda Yanin Azcárraga-Salinas, María Myrna Solís-Oba, Luis Carlos Fernández-Linares, José Agustín Pacheco-Ortiz, Annette Arisbeth Jiménez-Córdoba, Andres Castro-Sierra, Javier Ruiz-Romero

Análisis Electro-Térmico de Paneles Fotovoltaicos Utilizando Python **152-160**

Irvin D. Velasquez-Mora, Rodolfo A. Vargas-Méndez, Gloria L. Osorio-Gordillo, Carlos M. Astorga-Zaragoza, Juan Reyes-Reyes

Identificación de microplásticos en efluentes y afluentes de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal **161-167**

Flor Idalia Tirado Aguilar, Humberto Raymundo González Moreno, Carolina Peña Montes

Certificaciones y distintivos de sostenibilidad como herramientas estratégicas para las MiPyMEs mexicanas **168-180**

Delvis Estrada-Ruiz, Rosa-Olivia Maquinay-Díaz, Alicia Martínez-Rebollar, Daniela Hernández-Castañeda, Emmanuel Olmos-Barba

MESBI: Un Modelo de Estrategias Sostenibles para la Agricultura **181-191**

Rubén Alexis Flores-Nava, Alina Juantorena-Ugás, Jesús del Carmen Peralta-Abarca

Diseño Óptimo de un Sistema de Tratamiento de Efluentes Acuáticos Contaminados con Cromo Hexavalente Mediante una Cinética de Reducción en Estado Transitorio	192-198
Adrián López-Yañez, Estefanía Godoy-Colin, Gastón Martínez-De Jesús, Yoyce Obando-Galicia, José Alfredo Parra-Reyes	
Desempeño de un motor diésel que opera con mezclas biodiésel-diésel de aceite residual y de <i>Jatropha curcas</i>	199-205
Guillermo Benítez Olivares, Alejandro Torres Aldaco, Raúl Lugo Leyte, Helen Denise Lugo Méndez, Sergio Castro Hernández, Ladislao Eduardo Méndez Cruz	
Humedales construidos con plantas ornamentales para la eliminación de metales pesados en aguas residuales: una revisión sistemática	206-212
Jazmín Alejandra Segovia Cano, Luis Carlos Sandoval-Herazo	
Estudio del impacto en la desalineación por desfase de ubicación y rotación en campos de heliostatos	213-219
Job Ordaz-Castillo, Héctor Daniel García-Lara, Abraham Andrade-Puente, José Dhair Arredondo-Hernandez	
Conversión termoquímica de residuos sólidos de naranja a través de pirólisis para la producción de biochar con diversas aplicaciones	220-226
Julia Renata Hernández Roa, Laura Mila Saavedra, Romain Lemaire, Ofelia Landeta Escamilla, Norma Alejandra Vallejo-Cantú, Alejandro Alvarado-Lassman, Erik Samuel Rosas Mendoza	
Plan de negocio para la obtención de oro, aprovechando los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE'S); caso de estudio celulares	227-235
Saúl Hernández-Islas, Helen Monserrat Leyva-Martínez	
Análisis de las actividades y uso de la tierra mediante imágenes satelitales durante 2023 del municipio de Santo Domingo Zanatepec, Oaxaca	236-241
Gabriela Lizbeth Sanchez-Miguel, Hirvin Gorospe Zetina, Francisco Javier Naranjo-Luna, Rodolfo Campos-Tenorio, Mario Adrian Lopez Ortiz, Maria Guadalupe de los Santos Zavala	
Electropolimerización de EDOT y 5-amino-1,10-fenantrolinea en DES para la modificación de sensores electroquímicos	242-250
Estefanía Godoy-Colin, Adrián López-Yañez, Gastón Martínez-De Jesús, Silvia Corona-Avenidaño, Manuel Palomar-Pardavé	
Evaluación del líquido iónico acetato de etanolamina en la producción de metano utilizando como sustrato hidrolizados enzimáticos de bagazo de <i>Agave tequilana</i> var. azul	251-256
Raúl Snell-Castro, Jhovana Lizeth Lozano-López, Hugo Oscar Méndez-Acosta, José Antonio Pérez-Pimienta, Alma Toledo Cervantes	
Percepciones de la comunidad estudiantil sobre el Desarrollo Sustentable y la gestión del agua en Veracruz-Boca del Río	257-263
María Inés Mota-Gómez, Vania Jatziri Hernández-Herrera, Fabiola Lango Reynoso	

La importancia del monitoreo en la optimización energética de un sistema de bombeo en una unidad académica del IPN

Carlos Sánchez-Ramos ^{1,*}, Gustavo Gutiérrez-Sánchez ² y David Jiménez-Rodríguez ¹

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Unidad Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México

² Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Gustavo A. Madero. Ciudad de México, México

* Autor de correspondencia: carsanchez_ime@hotmail.com; Tel.: +52 9171059402

Desarrollo Sustentable (Desarrollo de Procesos Sustentables)

Recibido: 13 de junio de 2025 Aceptado: 26 de julio de 2025 Publicado: 26 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.530>

Resumen: Este estudio aborda la optimización del sistema de bombeo hidroneumático en una unidad académica del Instituto Politécnico Nacional (IPN), en el marco del cumplimiento de las políticas institucionales de eficiencia energética. El estudio consistió en la realización de un diagnóstico de eficiencia energética (DEE) el cual tiene los siguientes pasos: 1. Recopilación de información preliminar, 2. Recorrido por las instalaciones y monitoreo de parámetros, 3. Análisis de información y desarrollo de oportunidades y 4. Implementación de las oportunidades viables. El estudio de eficiencia energética reveló un alto consumo energético (66,640 kWh/año) debido a fallas operativas, como encendidos y apagados frecuentes, que afectaban la vida útil de las bombas. Se identificaron causas principales, como un tanque hidráulico dañado y fugas en el sistema, además de la falta de monitoreo continuo de los parámetros de funcionamiento. Se implementaron mejoras, como la reparación de fugas, el mantenimiento de las bombas y la optimización del ciclo de trabajo. El monitoreo de parámetros posteriores indicó una significativa disminución del consumo eléctrico, de 66,640 kWh/año a 3,875 kWh/año, lo que representa una reducción del 94.2%. El estudio concluye que la implementación de un sistema de monitoreo continuo es esencial para detectar desviaciones operativas tempranas, optimizar el consumo energético y extender la vida útil de los equipos.

Palabras clave: Sistema de bombeo, Ahorro de energía, Diagnostico energético, Mediciones eléctricas

The importance of monitoring in the energy optimization of a pumping system in academic unit of the IPN

Abstract: This study addresses the optimization of the hydropneumatic pumping system at an academic unit of the National Polytechnic Institute (IPN) within the framework of compliance with institutional energy efficiency policies. The study consisted of an energy efficiency assessment (EEA), which included the following steps: 1. Preliminary information gathering, 2. Facility tour and parameter monitoring, 3. Data analysis, and development of opportunities, as well as 4. The implementation of viable opportunities. The energy efficiency study revealed high energy consumption (66,640 kWh/year) due to operational failures, such as frequent switching on and off, which affected the lifespan of the pumps. Root causes were identified, including a damaged hydraulic tank and leaks in the system, in addition to a lack of continuous monitoring of operating parameters. Improvements were implemented, such as leak repair, pump maintenance, and duty cycle optimization. Monitoring of subsequent parameters indicated a significant decrease in electricity consumption, from 66,640 kWh/year to 3,875 kWh/year, representing a 94.2% reduction. The study concludes that implementing a continuous monitoring system is essential to detect operational deviations early, optimizing energy consumption, and extending the lifespan of the equipment.

Keywords: Pumping system, Energy saving, Energy diagnostics, Electrical measurements

Introducción

La sostenibilidad implica un enfoque integral que considera los aspectos ambientales, sociales y el desarrollo económico, una forma de mejorar la sostenibilidad de una empresa u organización es incrementar la eficiencia energética de sus equipos, sistemas y procesos productivos. La eficiencia energética es una medida fundamental para potenciar el desarrollo económico en las empresas a través de instalaciones más eficientes (Funseam, 2020). Una de las principales maneras de ahorrar energía es a través de las prácticas aplicadas en el día a día en la forma de operación y uso de equipos. La energía es algo que se puede gestionar, al hacerlo, se obtiene reducción de costos y el incremento de la competitividad (CONUEE/GIZ, 2016).

Numerosos factores pueden causar que un motor eléctrico falle, vibre o se sobrecaliente, como puede ser la lubricación, la alineación, la calidad de la energía, la ventilación y la carga (Goundar et al., 2015). El ciclo de vida de un motor eléctrico, en condiciones normales, se estima entre 15 y 20 años, aunque este período puede extenderse con un mantenimiento adecuado. Un mantenimiento eficiente no solo prolonga la vida útil de los motores, sino que también reduce el consumo energético, lo que es crucial en un mundo que busca optimizar los recursos energéticos y mitigar el impacto ambiental.

Un conjunto de mediciones y monitoreo de parámetros: eléctricos, térmicos, vibraciones y condiciones ambientales, puede ayudar a personal capacitado a realizar tareas de mantenimiento predictivo y preventivo (Ganga & Ramachandran, 2018), mejorando la "salud" de los sistemas electromotrices y reduciendo el consumo energético.

La eficiencia de la bomba centrífuga es un elemento determinante en la eficiencia del sistema de bombeo. Por lo tanto, una forma de mejorar la eficiencia energética es dimensionar óptimamente la instalación, buscando operar la bomba centrífuga en la región de máxima eficiencia, también conocida como Punto de Máxima Eficiencia (BEP-Best Efficiency Point en inglés) (Carravetta et al., 2020). Las principales causas de pérdida de energía en los sistemas de bombeo son el diseño incorrecto de la instalación de bombeo, la selección incorrecta de bombas para la instalación, la falta de modernización, el diseño hidráulico incorrecto de la instalación y las pérdidas en los equipos de regulación (Zimoch & Szymik-Gralewska, 2014).

Aproximadamente la mitad de las pérdidas de energía en los sistemas de bombeo, se deben a factores como el envejecimiento del sistema y al mal uso de este. En muchos casos, la bomba centrífuga se utiliza con cargas bajas o medias, a pesar de tener valores de eficiencia más altos con cargas cercanas a la nominal (Wong et al., 2014).

La elaboración de un estudio de eficiencia energética incluye un conjunto de técnicas para determinar el grado de eficiencia con la que es utilizada la energía en los procesos y equipos consumidores de energía, y a partir de éste, se detectan oportunidades de mejora en las instalaciones eléctricas y procesos correspondientes. Es necesario, además, implementar indicadores energéticos porque permiten la evaluación y el seguimiento de la salud energética de una empresa (Bruni et al., 2021).

En el marco del Programa Institucional hacia la Sustentabilidad del Instituto Politécnico Nacional (IPN), y con los siguientes objetivos: disminuir el consumo de energía eléctrica, la reducción indirecta de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), la mitigación del impacto ambiental asociado a las actividades cotidianas de la Unidad Académica y de dar cumplimiento a lo establecido en las Disposiciones Administrativas de Carácter General en Materia de Eficiencia Energética en los Inmuebles, Flotas Vehiculares e Instalaciones Industriales de la Administración Pública Federal, emitidas por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) (CONUEE, 2025). Este trabajo aborda la implementación de la metodología de la CONUEE para realizar un diagnóstico eficiencia energética (DEE) (Rosas, 2014), basada principalmente en el monitoreo de parámetros eléctricos y la identificación de áreas de oportunidad, en una unidad académica del Instituto Politécnico Nacional (IPN), dando prioridad al sistema de bombeo hidroneumático que presentaba problemáticas operativas, contribuyendo de esta manera al desarrollo de procesos sustentables dentro de las instalaciones del IPN.

Materiales y Métodos

El monitoreo de parámetros eléctricos del sistema de bombeo estudiado se llevó a cabo dentro del diagnóstico de eficiencia energética y se utilizó la metodología para estudios energéticos en sistemas de bombeo de agua de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) (Rosas, 2014). Aunque la metodología de CONUEE fue diseñada para sistemas de bombeo de organismos operadores de agua potable, ésta se puede aplicar para el estudio de un sistema de bombeo de agua de uso particular, ya que se evalúan sistemas de bombeo sin importar el tamaño o dimensión de los equipos. A continuación, se describen los pasos utilizados para el diagnóstico de eficiencia energética (ver Figura 1):

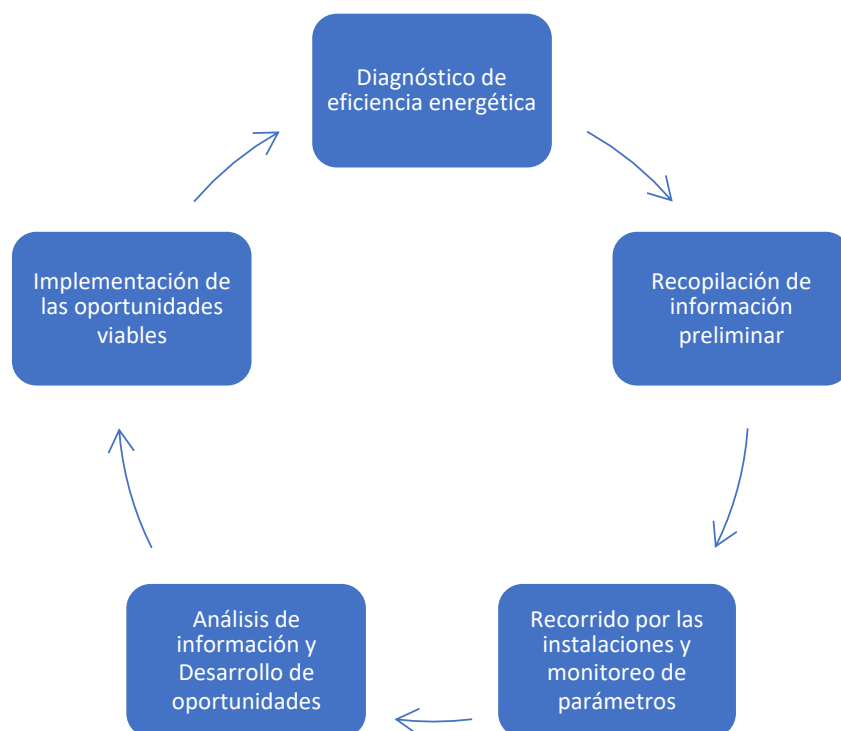


Figura 1. Metodología de un diagnóstico de eficiencia energética

1. Recopilación de información preliminar

En la recopilación de datos la principal estrategia es el análisis de los principales factores y equipos que consumen energía eléctrica de las instalaciones a evaluar. Se recopila información de las instalaciones: factura y/o recibos de consumos de electricidad, registros de los volúmenes de agua (en caso de estar disponibles). Adicionalmente, se solicitó información general, tal como: número de empleados, turnos de trabajo y días de operación al año. Se solicitaron las especificaciones técnicas de los sistemas tal como: tipo de tecnología, antigüedad promedio, capacidad, potencias, formas y tiempos de operación. Con la información anterior, se procedió a identificar preliminarmente las áreas de oportunidad de ahorro de energía; asimismo, se preparó un plan de trabajo para visitar las instalaciones y recolectar información adicional de los sistemas de mayor consumo de energía. En este paso se obtuvo información preliminar de las siguientes instalaciones y/o equipos: sistema de bombeo, laboratorios de cómputo, sistema de aire acondicionado, área de cafetería, iluminación, misceláneos (electrodomésticos, equipos de oficina).

2. Recorrido por las instalaciones y monitoreo de parámetros o mediciones (trabajos en campo)

Durante las visitas se realizaron recorridos para inspeccionar los siguientes sistemas y/o equipos: sistema de bombeo, sistema de iluminación, sistema de aire acondicionado y equipos de cómputo, obtener la información e identificar áreas de oportunidad. En la Tabla 1 se muestran los equipos que se utilizaron para realizar mediciones:

Tabla 1. Equipos de medición utilizados

No.	Equipo	Marca y modelo
1	Analizador de redes y calidad de la energía trifásico	FLUKE, modelo 434II
2	Amperímetro de gancho	EXTECH modelo MA-410
3	Termómetro infrarrojo	FLUKE modelo 62 MAX+
4	Termómetro Digital de contacto	TES modelo 1300

A partir de los datos obtenidos se realizan los cálculos energéticos y se determina el comportamiento del sistema.

Se realizaron mediciones en el interruptor general del sistema de bombeo, con la finalidad de identificar el perfil de carga de la instalación, la calidad de suministro eléctrico, consumo de energía, factor de potencia, entre otras variables eléctricas, para ello se utilizó el analizador de redes y calidad de la energía trifásico, a través de este equipo se obtuvieron datos como: voltaje de alimentación, corriente eléctrica, factor de potencia y demanda de energía. El periodo de tiempo de la medición continua al sistema de bombeo fue de una semana completa, en el caso de la gráfica mostrada en la Figura 4 un día se divide 5 secciones de 4.8 horas, mientras que en la gráfica de la Figura 5 un día lo forma 1 sección de 24 horas.

3. Análisis de información y Desarrollo de oportunidades (trabajos de gabinete)

En esta etapa se analizó la información obtenida del monitoreo de parámetros del sistema de bombeo, de esta forma se analizó el comportamiento de la demanda de energía eléctrica y se obtuvo el consumo de energía actual del sistema de bombeo, con base en la información recopilada en el trabajo en campo y el monitoreo de parámetros del sistema de bombeo se identificaron algunas áreas de oportunidad para mejorar la eficiencia energética del sistema.

4. Implementación de las oportunidades viables

En esta etapa se aplicaron las oportunidades o medidas seleccionadas por la empresa (en este caso el IPN) de acuerdo con la viabilidad. Después de la implementación fue necesario realizar nuevamente el monitoreo de parámetros (demanda y consumo de energía) para comprobar el desempeño energético de las oportunidades.

Sistema de bombeo (hidroneumático)

El sistema hidroneumático de la Unidad Académica abastece de agua a partir de una toma de suministro conectada a la red de distribución de agua potable de la Ciudad de México (CDMX). Adicionalmente, se reciben aportaciones de agua reciclada y agua potable mediante pipas; sin embargo, estas fuentes complementarias no representan una influencia significativa en el comportamiento energético del sistema en estudio.

El sistema está compuesto por tres bombas de 5 HP cada una (ver Figura 2), que operan de forma alternada, pero con posibilidad de funcionamiento simultáneo. Habitualmente, dos bombas trabajan en conjunto mientras una permanece en reposo.



Figura 2. Sistema Hidroneumático de la Unidad Académica

Características operativas del sistema de bombeo

El sistema de bombeo opera con una presión de arranque de 30 psi y una presión de paro de 44 psi en el conjunto de bombas. El tiempo de operación del sistema entre lunes y viernes es considerablemente mayor en comparación con los fines de semana, lo cual responde a la intensidad de uso del inmueble.

Resultados y Discusión

Consumo de energía en la Unidad Académica

De acuerdo con el monitoreo de parámetros eléctricos realizado con el equipo analizador de redes y calidad de la energía trifásico y el levantamiento de datos en la Unidad Académica se obtuvo la siguiente distribución del consumo de energía (ver Figura 3):

El consumo total anual de la Unidad Académica de acuerdo con el monitoreo es 711,894 kWh. Este consumo se encuentra distribuido entre los diversos sistemas eléctricos de la unidad, mientras que el consumo del sistema de bombeo es 66,640 kWh de acuerdo con el monitoreo del sistema.

En el caso del sistema de bombeo hidroneumático de la Unidad Académica se obtuvo una demanda promedio diaria de 13.31 kW durante los días hábiles y los sábados, mientras que los domingos se registró una demanda media de 11.16 kW (ver Figura 4).

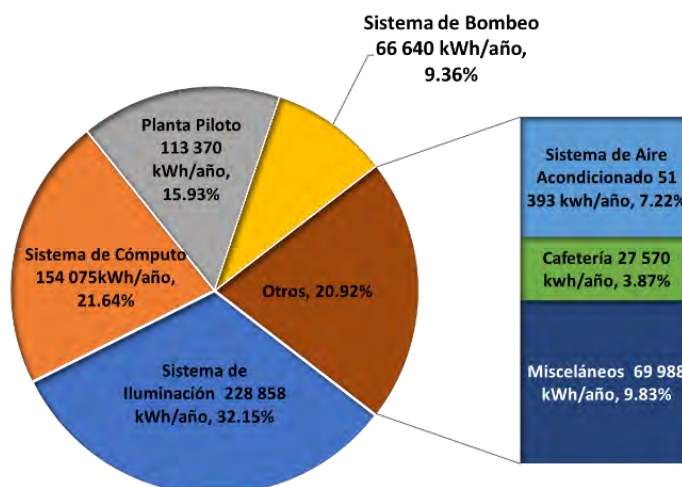


Figura 3. Consumo de la energía eléctrica de la Unidad Académica

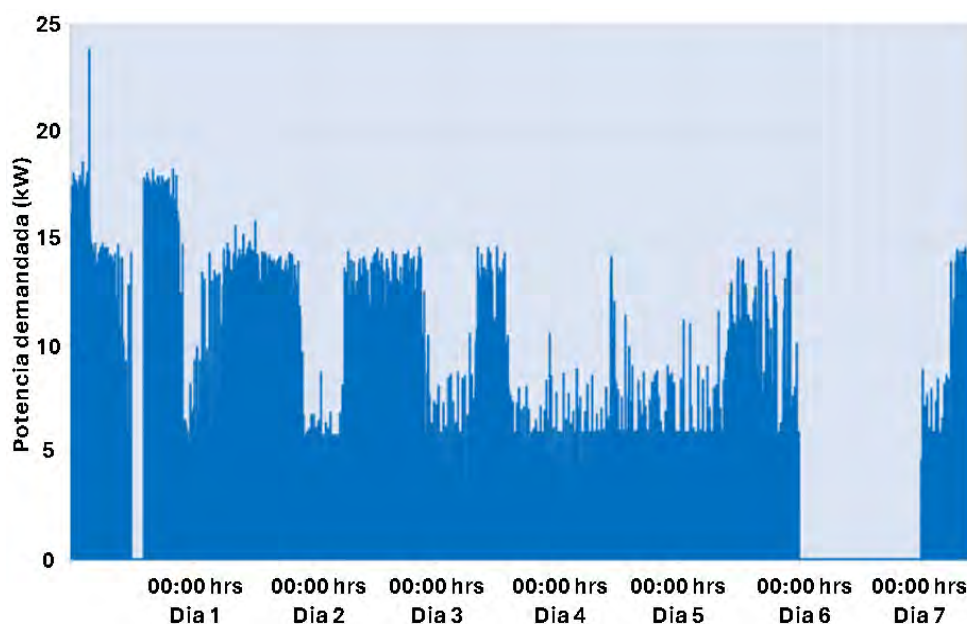


Figura 4. Demanda de energía eléctrica del sistema de bombeo de la Unidad Académica en Kilowatts (kW)

Adicionalmente, se identificó un comportamiento operativo cíclico anómalo en el régimen de trabajo de las bombas, ya que las bombas presentan intervalos de encendido y apagado de aproximadamente 30 y 60 segundos, respectivamente. Este patrón implica un número elevado de arranques y paros, lo cual impacta negativamente en la eficiencia operativa del sistema y reduce significativamente la vida útil de los equipos. Lo cual sugiere un mal ajuste en los controles de presión y demanda

Por otro lado, la temperatura de operación de las bombas no supera los 35 °C, lo que indica que, desde el punto de vista térmico, no existe un riesgo inmediato de sobrecalentamiento.

Diagnóstico del sistema

Con base en las mediciones realizadas y las observaciones en campo, se formularon las siguientes hipótesis respecto al comportamiento del sistema de bombeo:

1. Durante los días hábiles, especialmente en el horario de mayor actividad (de 06:00 a 23:00 h), el sistema presenta un funcionamiento intermitente continuo. Este comportamiento sugiere que el tanque presurizado podría estar dañado o presentar una falla funcional, impidiendo que se mantenga la presión requerida. En consecuencia, las bombas operan directamente bajo la demanda del usuario, lo que genera un desgaste prematuro y un uso ineficiente de la energía.
2. Durante los días inhábiles, se observa un funcionamiento intermitente más espaciado. Esto permite inferir la posible existencia de fugas en la red hidráulica, las cuales ocasionan pérdidas de agua, incrementan el consumo energético y reducen la vida útil del sistema.

Este conjunto de anomalías plantea una interrogante fundamental: ¿por qué se permitió que estas condiciones operativas persistieran hasta alcanzar el estado actual? La causa principal parece ser la ausencia de un monitoreo sistemático y la falta de registros históricos del comportamiento del sistema hidráulico. La implementación de un sistema de alertas tempranas para detectar desviaciones en la operación de bombas o motores podría haber contribuido significativamente a la detección oportuna de estos problemas.

Modificación del sistema hidráulico de la Unidad Académica

La Unidad Académica implementó las siguientes oportunidades en el sistema de bombeo:

- Reparación de fugas visibles en la red hidráulica.
- Mantenimiento preventivo y correctivo al tanque hidráulico y al compresor, ajustando su ciclo de trabajo dentro del rango de 2.3 a 2.8 kg/cm².
- Revisión y ajuste del tablero de control del sistema.
- Servicio integral a las bombas que conforman el sistema.

Comprobación de resultados mediante monitoreo de parámetros eléctricos

Como parte del análisis, se realizaron nuevamente mediciones eléctricas continuas utilizando un analizador de redes instalado en el interruptor termomagnético del sistema hidroneumático. A partir de los registros obtenidos, se identificaron los siguientes parámetros operativos y de consumo energético, como se muestra en la Figura 5.

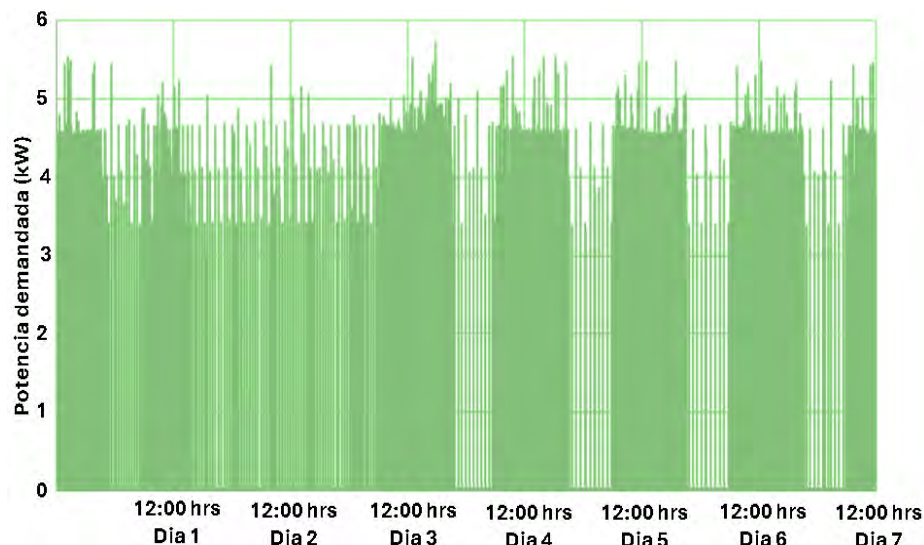


Figura 5. Demanda de energía eléctrica del sistema de bombeo después de implementar oportunidades de mejora

- Demanda promedio en día hábil: 3.66 kW, con un tiempo de operación de 4 horas diarias de manera alternada.
- Demanda promedio en sábado: 3.62 kW, con 1.5 horas de operación.
- Demanda promedio en domingo: 3.67 kW, con 1 hora de operación.
- Días inhábiles (vacaciones y días festivos): 3.61 kW, también con 1 hora de operación.

La variación en los tiempos de trabajo del sistema hidroneumático se encuentra directamente relacionada con la presencia de usuarios en la Unidad Académica. Como era de esperarse, de lunes a viernes el sistema opera de manera regular debido a las actividades académicas, mientras que durante los fines de semana y días inhábiles la frecuencia de operación disminuye significativamente.

Durante el diagnóstico de eficiencia energética, se identificó que el sistema de bombeo hidroneumático tenía un consumo anual de 66,640 kWh, y una demanda eléctrica promedio de 12.7 kW, esto indica que el sistema operaba en su totalidad, las 3 bombas funcionaban al mismo tiempo para lograr mantener el suministro de agua. El indicador de demanda eléctrica promedio medida (12.7 kW) por potencia disponible del sistema (15 HP) era 0.8 kW/HP, lo que indica que el sistema operaba a la potencia nominal.

Tras las acciones correctivas implementadas, incluyendo: el mantenimiento al tanque hidráulico, la reparación de fugas y la reconfiguración del sistema de control, el consumo medido es equivalente a 3,875 kWh/año, lo cual representa una disminución del 94.2 %, es decir, un ahorro de 62,765 kWh/año respecto al valor inicial (ver Figura 6).

En cuanto a la demanda de energía eléctrica, se tuvo una reducción de 9 kW, ya que el sistema actualmente funciona a cargas parciales requiriendo que 1 o máximo 2 bombas funcionen de manera simultánea. Estas acciones han impactado de manera positiva en la facturación de energía eléctrica, obteniendo ahorros en los conceptos de consumo de energía y demanda facturable, además que la subestación de la unidad académica tendrá esa cantidad de potencia disponible para suplir otras necesidades u operar en un punto más óptimo.

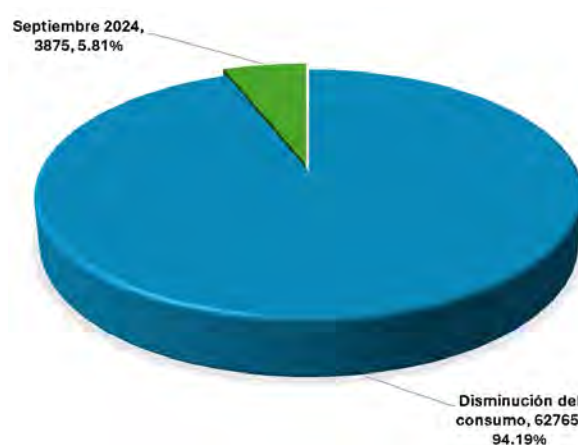


Figura 6. Disminución del Consumo por la implementación de oportunidades viables

Con la implementación de las oportunidades se tiene un indicador de demanda eléctrica (3.7 kW) por potencia disponible del sistema (10 HP) de 0.37 kW/HP, de acuerdo con datos de literatura consultada (Da Gama et al., 2017) un sistema de bombeo normalmente opera con un indicador de 0.65 kW/HP.

Este resultado evidencia que el sistema presentaba deficiencias operativas importantes, asociadas principalmente a la falta de monitoreo y registro sistemático de parámetros como presión, frecuencia de arranques/paros, demanda energética y volumen de agua suministrado. Esta ausencia de datos dificultó la detección oportuna de fallas y contribuyó al deterioro del rendimiento energético. El sistema actualmente opera a carga parcial, por lo que no trabaja a la máxima potencia sino que la regula dependiendo la demanda de agua, manteniendo una presión constante, reduciendo el funcionamiento continuo a máxima potencia que tenía el sistema debido a problemas de fugas, presión incorrecta y tanque presurizado dañado, operando a una mayor eficiencia por tanto esto se traduce en ahorros energéticos considerables tanto en demanda como en consumo de energía eléctrica.

Conclusiones

El sistema de bombeo hidroneumático de la Unidad Académica del IPN ha experimentado una mejora significativa en su eficiencia energética gracias a las acciones correctivas (oportunidades viables) implementadas, mediante el monitoreo de los parámetros eléctricos del sistema de bombeo se logró comprobar que existe una optimización energética en la operatividad del sistema de bombeo. Sin embargo, para mantener y potenciar estos logros, es fundamental implementar un sistema de monitoreo continuo de los parámetros de funcionamiento, que sea asequible, de bajo costo y fácil de usar. Un sistema de monitoreo de parámetros permitirá la detección temprana de desviaciones

que pueden comprometer tanto la eficiencia energética como la vida útil de los equipos, identificar fallas antes de que se conviertan en problemas mayores, optimizar la operación del sistema de bombeo ajustándola a las necesidades reales de consumo, reducir el desperdicio energético y minimizar los costos operativos, garantizando un uso más eficiente de los recursos. Implementar estas tecnologías será crucial no solo para mejorar el rendimiento de este sistema en particular, sino también para promover prácticas de sostenibilidad energética en otras instalaciones del IPN, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos institucionales con la eficiencia energética y el desarrollo sustentable.

Agradecimientos y financiamiento: Al Instituto Politécnico Nacional por apoyar con el financiamiento mediante el proyecto interno SIP 20250293, denominado: “Equipo de Medición y Monitoreo de Motores Eléctricos: Eficiencia Energética y Mantenimiento Predictivo” y al Ing. Martín Vargas Angeles, por contribuir con el monitoreo y el análisis de parámetros en el sistema de bombeo.

Bibliografía

- Bruni, G., De Santis, A., Herce, C., Leto, L., Martini, C., Martini, F., & Toro, C. (2021). From energy audit to energy performance indicators (EnPI): A methodology to characterize productive sectors. The Italian cement industry case study. *Energies*, 14(24), 8436. <https://doi.org/10.3390/en14248436>
- Carravetta, A., Giugni, M., & Malavasi, S. (2020). Application of innovative technologies for active control and energy efficiency in water supply systems. *Water*, 12(11), 3278. <https://doi.org/10.3390/w12113278>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2025). *Disposiciones administrativas de carácter general en materia de eficiencia energética en los inmuebles, flotas vehiculares e instalaciones industriales de la Administración Pública Federal 2025*. Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Gobernación.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2016). *Manual para la implementación de un sistema de gestión de la energía*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/223430/ManualGestionEnergia_2016.pdf
- Da Gama, A., Pimentel, A., & Rodrigues, J. (2017). Assessment of water pumping system and improvement in hydro-energetic performance. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 11(1), 42–50. <https://doi.org/10.4090/juee.2017.v11n1.042050>
- Funseam. (2020). *Eficiencia energética y transición ecológica*. Simposio empresarial internacional. Civitas.
- Ganga, D., & Ramachandran, V. (2018). IoT-based vibration analytics of electrical machines. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6), 4538–4549. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2018.2835724>
- Goundar, S., Pillai, M., Mamun, K., Islam, F., & Deo, R. (2015). Real time condition monitoring system for industrial motors. En *Proceedings of the 2nd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering* (pp. 1–9). <https://doi.org/10.1109/APWCCSE.2015.7476232>
- Rosas, R. (2014). *Guía para realizar diagnósticos energéticos y evaluar medidas de ahorro en equipos de bombeo de agua de organismos operadores de agua potable*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/268483/Gu_a_para_realizar_diagn_sticos_energ_ticos_y_evaluar_medidas_de_a_horro.pdf
- Wong, L. T., Mui, K. W., Lau, C. P., & Zhou, Y. (2014). Pump efficiency of water supply systems in buildings of Hong Kong. *Energy Procedia*, 61, 335–338. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.1119>
- Zimoch, I., & Szymik-Gralska, J. E. (2014). Risk assessment methods of a water supply system in terms of reliability and operation cost. *WIT Transactions on the Built Environment*, 139, 51–62. <https://doi.org/10.2495/UW140051>

Uso de bacterias purpura no sulfurosas en la remoción sulfuro de hidrógeno para la limpieza del biogás producido por digestión anaerobia

Sergio Cisneros-de la Cueva ^{1,*}, Cecilia Lizeth Álvarez Guzmán ², Francisco Javier Zavala Díaz de la Serna ¹, Rosario Peralta Perez ¹

¹ Laboratorio de biodigestión anaerobia, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, Chihuahua, México

² Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Querétaro, Querétaro, México

* Autor de correspondencia: sdelacueva@uach.mx; Tel.: +526142847644

Desarrollo Sustentable (Bioprocesos)

Recibido: 14 de junio de 2025

Aceptado: 7 de agosto de 2025

Publicado: 26 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.542>

Resumen: El sulfuro de hidrógeno generado durante la producción de biogás es un gas altamente corrosivo que puede dañar los equipos y, en casos graves, representar riesgos para la salud humana, por lo que su eliminación es esencial para el uso seguro del biogás. En este estudio, se utilizaron biorreactores a escala de laboratorio para evaluar la capacidad de eliminación de sulfuro de hidrógeno de las bacterias púrpuras no sulfurosas (PNSB). En cada reactor se suministraron 594.26 mg/L de sulfuro de hidrógeno durante 648 horas, logrando una reducción de hasta el $67.81 \pm 0.84 \%$ en condiciones de pH de 7.2 ± 0.02 y un potencial redox de 320.25 ± 3.74 mV. Los hallazgos de este estudio sugieren que las PNSB, debido a su alta eficiencia de eliminación de sulfuro de hidrógeno, pueden emplearse en procesos de biodesulfuración como una alternativa eficaz para la limpieza de biogás.

Palabras clave: biodesulfuración, bacteria purpura no azufrada, sulfato, sulfuro de hidrógeno

Use of non-sulfur purple bacteria in the removal of hydrogen sulfide for the cleaning of biogas produced by anaerobic digestion

Abstract: Hydrogen sulfide generated during biogas production is a highly corrosive gas that can damage equipment and, in severe cases, pose health risks to humans, making its removal essential for safe biogas use. In this study, laboratory-scale bioreactors were used to evaluate the hydrogen sulfide removal capacity of purple non-sulfur bacteria (PNSB). Each reactor was supplied with 594.26 mg/L of hydrogen sulfide over 648 hours, achieving up to a $67.81 \pm 0.84 \%$ reduction under conditions of pH of 7.2 ± 0.02 and a redox potential of 320.25 ± 3.74 mV. The findings of this study suggest that PNSB due to their high hydrogen sulfide removal efficiency can be employed in biodesulfurization processes as an effective alternative for biogas cleaning.

Keywords: biodesulfurization, non-sulfur purple bacteria, sulfate, hydrogen sulfide

Introducción

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico corrosivo que se produce a partir de la degradación anaerobia de compuestos orgánicos durante la producción doméstica e industrial del biogás (Dada *et al.*, 2025). En los biodigestores las bacterias sulfato reductoras son las principales responsables de la producción de sulfuro de hidrógeno (Sarti y Zaiat 2011). El sulfuro de hidrógeno se caracteriza por ocasionar corrosión en acero y hormigón, afectando seriamente equipo e infraestructura de las instalaciones. Una exposición prolongada en concentraciones cercanas a 5 ppm de sulfuro de hidrógeno puede llegar a causar daño ocular, y afectar las vías respiratorias (Sarti y Zaiat 2011). El sulfuro de hidrógeno se puede eliminar haciendo uso tanto de procesos fisicoquímicos como biológicos (Pudi *et al.*, 2022). Algunos de los métodos fisicoquímicos convencionales son la adsorción y precipitación con sustancias alcalinas. Ambos procesos se caracterizan por ser rápidos y efectivos, sin embargo, su consumo de energía es elevado y generan residuos contaminantes (Krayzelova, 2014).

Los métodos que incluyen tecnologías biológicas como la biodesulfuración se basan principalmente en el uso de microorganismos capaces de crecer en compuestos inorgánicos de azufre reducido como el sulfuro de hidrógeno los cuales pueden superar los inconvenientes de consumo de energía y generación de desechos ambientales (Pudi *et al.*, 2022). En el mecanismo de biodesulfuración, los microorganismos utilizan sulfuro de hidrógeno como un donante de electrones que es llevado a través de una serie de reacciones de oxidación para la producción de sulfato o azufre acorde

al metabolismo llevado por la bacteria. Las PNSB son microorganismos que poseen enzimas oxidativas que les otorga la capacidad metabólica de crecer foto-autotróficamente, utilizando diferentes compuestos reducidos de azufre, como el sulfuro de hidrógeno para la fijación de dióxido de carbono haciendo que este grupo de microorganismos sean buenos candidatos en los procesos de biodesulfuración (Tec-Campos *et al.*, 2023; Phuc *et al.*, 2024).

Ha sido reportado que algunos géneros de PNSB tienen la capacidad de oxidar sulfuro de hidrógeno, sin embargo, poco se ha investigado con respecto al metabolismo oxidativo del azufre y su potencial en la remoción de sulfuro de hidrógeno presente en el biogás. El objetivo de este estudio fue evaluar el potencial de una PNSB en la remoción de sulfuro de hidrógeno para ser utilizada como alternativa en los procesos de limpieza del biogás.

Materiales y Métodos

Aislamiento y crecimiento de PNSB

Las PNSB fue aislada de una laguna de aguas residuales en Gómez Palacio Durango, México. Para el aislamiento de la PNSB, muestras de agua de la laguna fueron tomadas en recipientes estériles para ser almacenados a 4°C para su posterior uso en el laboratorio. Para la reactivación y crecimiento de PNSB, se tomaron 0.1 mL de la muestra de agua y se depositaron en cajas Petri con medio de agar nutritivo. Las cajas fueron depositadas en una jarra de anaerobiosis transparente colocada en una incubadora por 168 h que mantenía condiciones a 35°C y una emisión de 1500 lux con lámparas de tungsteno. Para la selección, la PNSB fue inoculada en botellas de plástico que contenían 250 mL de medio líquido mineral modificado descrito por van Gernerden y Beeftink (1978) con la siguiente composición en g/L: 0.31 de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, 0.25 de NH_4Cl , 2 de NaHCO_3 , 0.2 de CaCl_2 , 0.6 de K_2HPO_4 , 0.5 de KH_2PO_4 , 0.2 de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y 10 mL de una solución de elementos traza de Pfennig y Lippert, (1966) ajustado el pH a 7.0. Los frascos se colocaron en una incubadora con agitación a 150 rpm a 35°C. Después del periodo de incubación se tomó una muestra de los frascos para caracterizar la morfología microscópica de la PNSB utilizando un microscopio óptico de la marca Olympus.



Figura 1. Sitio de muestreo de la laguna de aguas residuales en Gómez Palacio Durango, México para el aislamiento y crecimiento de PNSB

Montaje experimental

Para las pruebas de biodesulfuración en modo semicontinuo, se utilizaron botellas de plástico de 3L con un volumen de trabajo de 1.5 L. Cada botella contenía medio mineral modificado descrito por van Gernerden y Beeftink (1978) que de su composición antes mencionada únicamente se no adiciono $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Las botellas fueron inoculadas al 20% v/v con PNSB, únicamente el control no fue inoculado. Cada 24 horas partir de las 0 h hasta 648 h se estuvo adicionando biogás con un flujo de 2 mL/min por una hora, así mismo tiempo al final de cada suministro se determinó la concentración de sulfuro de hidrógeno que quedaba en el medio mineral (Tabla 1). Durante todo el periodo experimental las botellas se dejaron en una incubadora a 35°C con agitación a 150 rpm y una intensidad de luz de 1500 lux (Figura 2). Todos los experimentos fueron realizados por duplicado

Métodos analíticos

La determinación de concentración de sulfuro de hidrógeno fue de acuerdo al ensayo de azul de metileno (4500-S2-D, APHA *et al.*, 1995).

El pH se determinó utilizando un pH metro de la marca HANNA Instrument con un electrodo HI 1131B. El potencial oxido redox (ORP) se determinó utilizando pH metro marca HANNA con un electrodo de platino y semicelda de referencia Ag/AgCl.



Figura 2. Etapas del montaje experimental para evaluar el potencial de biodesulfuración de PNSB

Resultados y Discusión

Caracterización microbiológica de PNSB

En este estudio se logró cultivar PNSB de una laguna de aguas residuales (Figura 1) que presentaba un color rojo intenso con un fuerte olor a huevo podrido. Se ha reportado que PNSB pertenecientes al grupo de microorganismos fotosintéticos anoxigénicos se encuentran preferentemente en ambientes microaeróbicos-anaeróbicos expuestos a la luz solar y deficientes en oxígeno (Dhar *et al.*, 2023). La PNSB aislada caracterizada mostro colonias de coloración rojo intenso después de 168 horas de cultivo resultó ser una bacteria móvil en el que las células presentaban forma de bastón (Figura 3A,3B). En general las PNSB son células móviles que se caracterizan por presentan un color marrón rojizo tener forma de bastón de 0.8 a 1.2 mm de ancho y 2.0 a 6.0 mm de largo (Venkata *et al.*, 2012).

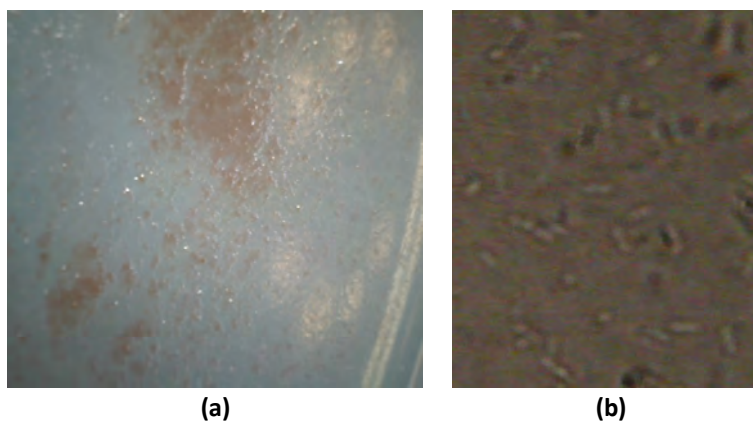


Figura 3. a) Morfología colonial de PNSB en una placa Petri con agar nutritivo y b) Frotis en fresco visualizado utilizando el objetivo microscópico de inmersión 100X del microscopio óptico

Consumo de sulfuro de hidrógeno por PNSB

El comportamiento cinético de consumo de sulfuro de hidrógeno se muestran los gráficos de la figura 4A. De acuerdo al comportamiento cinético, durante las primeras 48 horas se obtuvieron valores de remoción de 8.37 ± 0.21 mg/L, mientras que partir de las 72 horas hasta 504 horas se muestra claramente una fase exponencial de remoción, obteniéndose valores de remoción de sulfuro de hidrógeno de 381.72 ± 3.94 mg/L. Sin embargo, a partir de las 528 horas se observa un declive en la curva, presentándose un comportamiento asintótico para obtener valores finales de remoción de 403 ± 5.01 mg/L correspondiente al 67.79 ± 0.74 %. En los experimentos abióticos el sulfuro de hidrógeno se incrementó en vez de disminuir, ya que se muestra que hubo una acumulación (Tabal 1). Esto nos indica que la remoción de sulfuro de hidrógeno obtenida en los experimentos se debió únicamente al efecto de la asimilación metabólica de PNSB y no a factores abióticos.

Tabla 1. Valores de concentración de sulfuro de hidrógeno obtenidos a partir de experimentos abióticos y con PNSB durante las 648 h

Tiempo (Horas)	Abiótico	PNSB	
	Concentración de sulfuro de hidrógeno (mg/L) añadido al medio en el medio	Remoción de sulfuro de hidrógeno (%)	Consumo acumulado de sulfuro de hidrógeno (mg/L)
0	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
24	15.60±0.52	15.98±0.61	2.49±0.09
48	34.42±1.51	18.44±0.91	8.38±0.21
72	61.60±1.92	27.12±4.74	22.81±2.68
96	91.63±2.17	31.21±7.03	44.38±3.00
120	117.97±2.49	34.45±3.14	69.78±0.35
144	139.87±3.44	54.30±4.47	107.85±2.98
168	165.18±3.54	82.79±3.60	155.36±1.55
192	185.38±3.88	91.78±3.02	182.89±1.03
216	198.06±4.02	93.30±2.50	197.03±0.45
240	218.50±4.12	91.11±1.39	216.58±0.34
264	243.63±4.35	80.55±0.55	238.37±0.22
288	265.04±4.47	67.53±0.08	256.38±0.09
312	294.39±4.79	66.86±0.36	281.79±0.11
336	322.62±5.75	55.29±0.87	304.36±0.40
360	349.62±4.99	44.75±0.89	324.61±0.63
384	373.33±4.37	33.91±0.84	341.13±0.82
408	385.15±4.08	18.61±0.69	349.32±0.97
432	393.74±3.57	12.56±0.34	354.90±0.70
456	408.76±3.22	13.32±4.08	362.06±2.80
480	428.74±2.28	10.88±1.91	369.29±3.77
504	450.55±2.33	11.80±0.88	378.86±4.04
528	477.06±2.36	11.60±0.73	390.24±4.29
552	502.01±2.46	5.24±0.64	396.08±4.78
576	522.03±2.31	2.38±0.39	399.07±5.16
600	546.82±2.50	0.62±0.16	400.00±4.88
624	570.14±3.27	0.33±0.20	400.57±4.52
648	591.36±4.10	0.17±0.07	400.90±4.39

Los experimentos mostraron que PNSB tiene una alta tolerancia al sulfuro de hidrógeno (Figura 4A), sin embargo, atribuimos que la sobre carga continua de sulfuro de hidrógeno contribuyo a la inhibición de la asimilación de sulfuro de hidrógeno por PNSB. Se ha reportado que el sulfuro de hidrógeno provoca daño celular inhibiendo las actividades

enzimáticas antioxidantes de la superóxido dismutasa, catalasa y glutatión reductasa, así como también induce a una peroxidación lipídica y daño en el ADN (Fu *et al.*, 2018). En otros estudios también se ha reportado que una sobrecarga en el reactor con sulfuro de hidrógeno puede llevar a una sobre reducción del grupo de quinonas lo lleva a una disminución en el transporte de electrones a través del fotosistema y por tanto una disminución en la producción de ATP causando efectos negativos en el crecimiento de las bacterias (Schütz *et al.*, 1999).

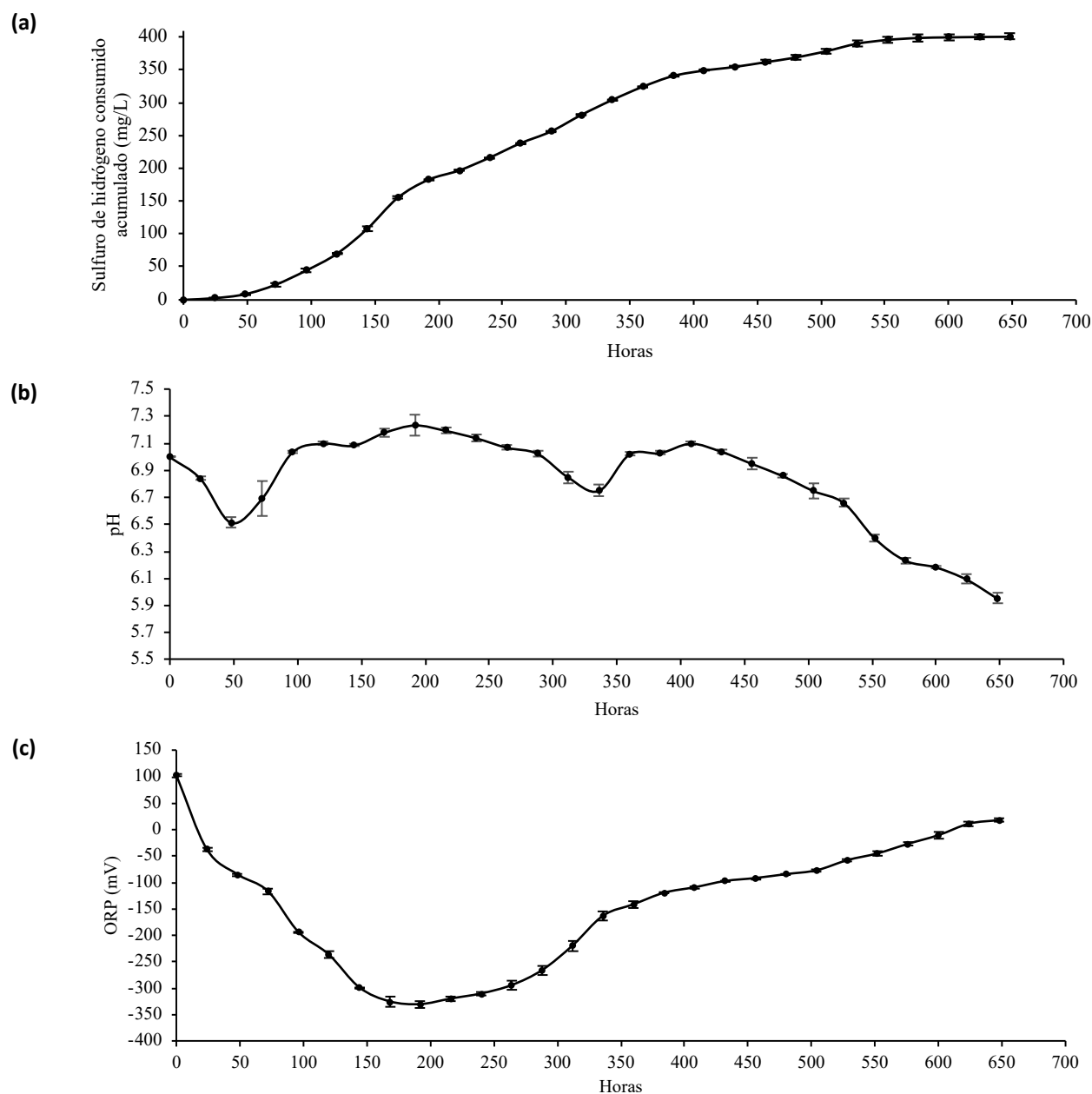


Figura 4. a) Comportamiento cinético de los datos experimentales para la remoción de sulfuro de hidrógeno, b) Comportamiento cinético de pH y c) Comportamiento cinético del potencial óxido reducción (ORP). La desviación estándar es correspondiente de $n=2$

Efecto del pH sobre la remoción de sulfuro de hidrógeno

El pH es un parámetro de medición de gran importancia en el proceso de biodesulfuración ya que se puede evaluar el estado fisiológico de los microorganismos durante la asimilación metabólica del sulfuro de hidrógeno. Los valores de pH (Figura 4B) obtenidos oscilaron entre 6-7 teniendo que durante las primeras 72 horas en condiciones de pH de 6.60 la eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno fue de aproximadamente del $26.4 \pm 4.61\%$ (Tabla 1). Sin embargo, a

partir de las 96 horas hasta las 432 horas, el pH se mantuvo en la neutralidad (valor de pH de 7.0) alcanzando la mayor eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno. A partir de las 480 horas hasta 648 horas, los valores de pH disminuyeron en un rango entre 6.8 a 5.9, bajo esta condición la remoción de sulfuro de hidrógeno disminuyó significativamente hasta el cese de la remoción (Figura 4A). Los datos de pH nos mostraron que a valores en un rango de aproximadamente de 7.0 se favorece notablemente la remoción de sulfuro de hidrógeno, mientras que a valores de pH por debajo de 6 se ve afectada la remoción de sulfuro de hidrógeno lo cual se puede atribuir a la falta de oxidación del sulfuro de hidrógeno. Janssen *et al.* (1997) reportaron que el rango de pH entre 7.5 a 8.0 es el adecuado para que se lleve a cabo la oxidación de sulfuro a sulfato. Otros estudios realizados por Xu, *et al.* (2016), reportaron que el pH juega un papel muy importante en la conversión del sulfuro teniendo que el rendimiento máximo de desulfuración ocurre en condiciones cercanas a la neutralidad (pH de 7.5 a 8.0).

Efecto del potencial oxido redox sobre la remoción de sulfuro de hidrógeno

El ORP es un parámetro fisicoquímico importante ya que es una medida indirecta del intercambio de electrones que ocurre durante proceso y describe el estado fisiológico de las bacterias del medio (Johnston *et al.*, 2024). En la figura 4C se muestra que el ORP inicial fue de +103 mV, y conforme fue transcurriendo el tiempo los valores de ORP fueron disminuyendo hasta obtener los valores de ORP de -330.8 mV a las 192 horas. Sin embargo, a partir de las 216 horas los valores de ORP se incrementaron hasta obtener valores de +17.9 mV a las 648 horas. El comportamiento de ORP antes mencionado puede estar correlacionado con los valores de sulfuro de hidrógeno consumido, ya que se muestra en la figura 4A, que los valores en los que obtuvo la mayor eficiencia de remoción de sulfuro de hidrógeno fue a partir de los valores más bajos de ORP. Mientras que los valores más altos de ORP fueron obtenidos para los valores más bajos de remoción de sulfuro de hidrógeno. Durante el crecimiento autótrofo en bacterias fotosintéticas, el sulfuro de hidrógeno provee de electrones para la reducción de NAD^+ necesarios para la fijación de CO_2 . En la mayoría de las bacterias el transporte de electrones desde el sulfuro hasta NAD^+ , se realiza en la membrana a través de diferentes complejos enzimáticos. En este mecanismo la sulfuro quinona oxidoreductasa quien recibe el sulfuro de hidrógeno, es menos negativo que el par NAD^+/NADH , requiriendo de mayor energía para transportar los electrones, por tanto, los valores negativos de ORP son un indicativo que el sulfuro de hidrógeno este siendo asimilado por las bacterias fototróficas (Griesbeck *et al.*, 2000). Por lo anterior atribuimos el favorecimiento de la asimilación de sulfuro de hidrógeno a valores de ORP de -325 mV y la inhibición de la remoción a valores de ORP de +17.3 mV.

Conclusiones

En este estudio se demostró la adaptabilidad metabólica de PNSB para lograr una reducción de sulfuro de hidrógeno de 67.81 ± 0.84 % durante 648 horas. Tanto el pH como el potencial oxido redox tuvieron un rol importante durante la asimilación metabólica del sulfuro de hidrógeno, teniendo que a valores de pH cercanos a 7.0 con valores de ORP de -330.8 mV se favoreció la biodesulfuración, obteniéndose los valores más altos de remoción de sulfuro de hidrógeno. Mientras que a valores de pH inferiores de 6.0 con valores de ORP de +17.9 mV se muestra inhibición de la remoción de sulfuro de hidrógeno. En general, la alta tolerancia de PNSB respalda su uso en los procesos de desulfuración en plantas de tratamiento de purificación de biogás producido por digestión anaerobia.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores desean expresar su sincero agradecimiento a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua por proporcionar el ambiente apropiado para el trabajo y el equipo necesario para realizar los experimentos.

Bibliografía

- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Pollution Control Federation. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (19th ed.). Washington, DC, Estados Unidos: American Public Health Association.
- Dada, O. I., Yu, L., Neibergs, S., & Chen, S. (2025). Biodesulfurization: Effective and sustainable technologies for biogas hydrogen sulfide removal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 209, 115144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115144>
- Dhar, K., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2023). Anoxygenic phototrophic purple non-sulfur bacteria: Tool for bioremediation of hazardous environmental pollutants. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03729-7>
- Fu, L. H., Wei, Z. Z., Hu, K. D., Hu, L. Y., Li, Y. H., Chen, X. Y., Han, Z., Yao, G. F., & Zhang, H. (2018). Hydrogen sulfide inhibits the growth of *Escherichia coli* through oxidative damage. *Journal of Microbiology*, 56(4), 238–245. <https://doi.org/10.1007/s12275-018-7537-1>

- Griesbeck, C., Schütz, M., Schödl, T., Bathe, S., Nausch, L., Mederer, N., Vielreicher, M., & Hauska, G. (2002). Mechanism of sulfide-quinone reductase investigated using site-directed mutagenesis and sulfur analysis. *Biochemistry*, 41(39), 11552–11565. <https://doi.org/10.1021/bi026032b>
- Janssen, A., Ma, S. C., Lens, P., & Lettinga, G. (1997). Performance of a sulfide-oxidizing expanded-bed reactor supplied with dissolved oxygen. *Biotechnology and Bioengineering*, 53, 32–40.
- Johnston, K. A. K. Y., van Lankveld, M., de Rink, R., Mol, A. R., Keesman, K. J., & Buisman, C. J. N. (2024). Influence of oxidation–reduction potential and pH on polysulfide concentrations and chain lengths in the biological desulfurization process under haloalkaline conditions. *Water Research*, 259, 121795. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121795>
- Krayzelova, L., Bartacek, J., Kolesarova, N., & Jenicek, P. (2014). Microaeration for hydrogen sulfide removal in UASB reactor. *Bioresource Technology*, 172, 297–302. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.056>
- Pfennig, N., & Lippert, K. D. (1966). Über das Vitamin B₁₂-Bedürfnis phototropher Schwefelbakterien. *Archiv für Mikrobiologie*, 55, 245–256.
- Phuc, D. T., Yen, P. B., Hai, P. T., Dam, L., & Lien, B. (2024). Evaluating the sulfur oxidation capability of a *Rhodopseudomonas palustris* strain by gene and enzyme analyses for potential applications in environmental bioremediation. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 40, 107–114.
- Pudi, A., Rezaei, M., Signorini, V., Andersson, M. P., Baschetti, M. G., & Mansouri, S. S. (2022). Hydrogen sulfide capture and removal technologies: A comprehensive review of recent developments and emerging trends. *Separation and Purification Technology*, 298, 121448. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121448>
- Sarti, A., & Zaiat, M. (2011). Anaerobic treatment of sulfate-rich wastewater in an anaerobic sequential batch reactor (AnSBR) using butanol as the carbon source. *Journal of Environmental Management*, 92, 1537–1541. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.009>
- Schütz, M., Maldener, I., Griesbeck, C., & Hauska, G. (1999). Sulfide-quinone reductase from *Rhodobacter capsulatus*: Requirement for growth, periplasmic localization, and extension of gene sequence analysis. *Journal of Bacteriology*, 181(20), 6516–6523. <https://doi.org/10.1128/jb.181.20.6516-6523.1999>
- Tec-Campos, D., Posadas, C., Tibocha-Bonilla, J. D., Thiruppathy, D., Glonek, N., Zuñiga, C., Zepeda, A., & Zengler, K. (2023). The genome-scale metabolic model for the purple non-sulfur bacterium *Rhodopseudomonas palustris* Bis A53 accurately predicts phenotypes under chemoheterotrophic, chemoautotrophic, photoheterotrophic, and photoautotrophic growth conditions. *PLOS Computational Biology*, 19, 1–26. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1011371>
- van Gernerden, H., & Beertink, H. H. (1978). Specific rates of substrate oxidation and product formation in autotrophically growing *Chromatium vinosum* cultures. *Archives of Microbiology*, 119(2), 135–143. <https://doi.org/10.1007/BF00964264>
- Venkata Ramana, V., Kalyana Chakravarthy, S., Shalem Raj, P., Vinay Kumar, B., Shobha, E., Ramaprasad, E. V. V., Sasikala, C., & Ramana, C. V. (2012). Descriptions of *Rhodopseudomonas paropalustris* sp. nov., *Rhodopseudomonas harwoodiae* sp. nov. and *Rhodopseudomonas pseudopalustris* sp. nov., and emended description of *Rhodopseudomonas palustris*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 62, 1790–1798. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.026815-0>
- Xu, J., Fan, Y., & Li, Z. (2016). Effect of pH on elemental sulfur conversion and microbial communities by autotrophic simultaneous desulfurization and denitrification. *Environmental Technology*, 37(23), 3014–3023. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1173117>

Uso de mango criollo (*Anacardiaceae*) como alternativa para elaborar productos alimenticios y biofertilizante en el Estado de Campeche

Asteria Narváez-García, Celia Verónica Blanco-Cornelio, Yunuen Canedo-López, Juan Carlos Robles-Heredia *

Laboratorio de Ciencias Básicas, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche, México

* Autor de correspondencia: jrobles@pampano.unacar.mx

Desarrollo Sustentable (Agricultura Sustentable)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 26 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.567>

Resumen: El mango es una fruta de origen tropical apreciada en México y resto del mundo. Ocupa el tercer lugar entre los frutos tropicales, después del plátano y la piña. La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader) reporta que, en 2023, México produjo 2 millones.237 mil toneladas de mango, mientras que, en Campeche, durante el periodo 2006-2015, el mango criollo representó el 6.1 % de la superficie total cosechada de mango. Este fruto presenta una pulpa dulce y jugosa, tiene escasa relevancia económica; recomendable para elaborar productos alimenticios succulentos, utilizables para venta; sin embargo, se generan desechos que pueden ser empleados, como biofertilizante. Se obtuvieron subproductos alimenticios a partir de la pulpa y biofertilizante de la cáscara y semilla. Este trabajo surge con la idea de proponer alternativas para el aprovechamiento de recursos agrícolas de bajo valor comercial como el mango criollo, elaborando subproductos y obtener ganancias económicas para las poblaciones. Con la pulpa se elaboraron jalea y salsa de habanero-mango, para el biofertilizante se utilizó la cáscara y las semillas. Se realizaron análisis organolépticos para los alimentos, bromatológicos y vida de anaquel, aquí se incluyó al biofertilizante. El interés fue proponer técnicas de aprovechamiento para este fruto, reutilizar residuos y eliminar problemas ambientales.

Palabras clave: Mango criollo (*Anacardiaceae*), Recursos agrícolas, Biofertilizante

Use of creole mango (*Anacardiaceae*) as an alternative for producing food products and biofertilizer in the State of Campeche

Abstract: The mango is a tropical fruit appreciated in Mexico and the rest of the world. It ranks third among tropical fruits, after bananas and pineapple. The Secretariat of Agriculture and Rural Development (Sader) reports that in 2023 Mexico produced 2.237 million tons of mango, while in Campeche, during the period 2006–2015, criollo mango accounted for 6.1 % of the total harvested mango area. This fruit has a sweet, juicy pulp and is of little economic importance. It is recommended for making succulent, marketable food products. However, it generates waste that can be used as biofertilizer. Food byproducts were obtained from the pulp, and biofertilizer was obtained from the peel and seed. This work aims to propose alternatives for the use of low-value agricultural resources, such as the native mango, by producing byproducts and generating economic benefits for the communities. The pulp was used to make habanero-mango jelly and salsa, and the peel and seeds were used for biofertilizer. Organoleptic, food, and shelf-life analyses were performed, including biofertilizer. The goal was to propose techniques for utilizing this fruit, reusing waste, and eliminating environmental problems.

Keywords: Creole Mango (*Anacardiaceae*), Agricultural Resources, Biofertilizer

Introducción

El mango es una fruta de origen tropical muy apreciada en México y de las más consumidas a nivel mundial. Ocupa el tercer lugar entre los frutos tropicales, después del plátano y la piña, y el quinto de todos los frutos. Los principales países productores son la India, China, Tailandia, Indonesia y México. Siendo México el quinto lugar de producción y uno de los principales exportadores (Maldonado *et al.*, 2016).

Actualmente se satisface 100% de los requerimientos nacionales con producción interna; asimismo, las importaciones mundiales han aumentado 34.75% en la última década, lo que ha generado un incremento en las exportaciones mexicanas principalmente con destino a Estados Unidos y Canadá. También se establecen desarrollos regionales para mejorar las zonas del sureste del país (SAGARPA, 2022).

El mango criollo (*Anacardiaceae*) es una fruta con alto valor nutricional que posee una gran cantidad de vitaminas, fibras, antioxidantes y proteínas. Así como también una alta concentración de minerales como potasio y magnesio.

El fruto se caracteriza por un color amarillo y base rojiza, con una pulpa firme y uniforme. Su semilla y cáscara pueden ser considerados desechos, pero estos son una fuente importante de compuestos bioactivos, tales como la pectina, polifenoles y mangiferina. La composición del mango depende de su variedad y principalmente por el estado de madurez que tenga, ya que el fruto maduro indica la presencia de ácido ascórbico (vitamina C), de modo que los niveles de esta vitamina bajan, pero se hacen ricos en provitamina A y vitaminas B1 y B2 (Gómez y Guzmán, 2019).

En la actualidad, los productos alimenticios elaborados con frutas convencionales suelen tener un alto contenido de azúcares y, en gran medida, de aditivos. Además, aquellos productos que incluyen conservadores y aditivos tienden a tener un precio más elevado, y su producción puede ser bastante compleja. Los costos de producción y cosecha del mango criollo resultan ser rentables para la exportación a otros países.

Las fechas de cosecha son parámetros importantes para la industrialización de este fruto, en México los periodos comprenden de febrero a septiembre, sin embargo, esta depende de la variedad y zona de cultivo. Por ello, es recomendable determinar el número de días de floración a madurez, es decir, los cambios de color, el peso específico, la proporción de sólidos-ácidos y el periodo climatérico de la respiración; por tal motivo se deben efectuar muestreos periódicos o bien hacer que los frutos maduren y que sean analizadas sus propiedades organolépticas (Ramírez Pérez, 2015).

Plagas que afectan las cosechas de mango

Dentro de las plagas que mayor efecto negativo tienen en los frutos de mango, se pueden mencionar los siguientes:

Cochinilla

La cochinilla del mango provoca daños en tallos, hojas y frutos, alimentándose de la savia y originando un debilitamiento general de la planta, reduciendo el vigor y el tamaño de la hoja, la aparición de decoloraciones amarillas en las mismas, caída de hojas, muerte de ramas e incluso del árbol. Además, producen una melaza sobre las partes afectadas, lo que favorece el ataque de diversos hongos, en frutos, aunque no causa daños en la parte interna, produce manchas rosadas alrededor de las zonas afectadas, pudiendo alterar la maduración y depreciando su calidad y valor comercial. Estas pérdidas pueden suponer hasta el 50% del volumen de la cosecha si no se controla la plaga a tiempo (Agrotrapiche, 2020).

Trips en Mango

Los trips son también plagas importantes en el cultivo de mango que causan severos daños en las hojas tiernas debido a que pican y chupan el tejido epidérmico; con ello causan lesiones necróticas intervenales, lo que puede terminar en defoliación y muerte de las puntas de las ramas. Las infestaciones severas de algunos trips pueden resultar en defoliación intensa y clorosis, o bien defoliación de brotes tiernos, lo que repercute en la floración y producción siguiente (Durán *et al.*, 2017). Este insecto deposita sus huevos en las flores y frutos del mango, luego crecen las plantas y se alimentan del fruto unos días. La presencia de trips está asociada a deformaciones, manchas, agrietamiento, decoloración y caída prematura de frutos en desarrollo. Adicional a lo anterior, se encuentra el efecto nocivo en la presentación del producto en su etapa final, disminuyendo significativamente el volumen con calidad para el mercado internacional. En México y en muchas partes del mundo, el control de trips se basa convencionalmente en el uso de insecticidas químicos sistémicos, de contacto, ingestión y de amplio espectro (Monteón-Ojeda *et al.*, 2020).

Mosca de fruta

La Mosca de fruta es la plaga más importante de los cultivos, atacan a las frutas y tienen carácter endémico. Gran parte de los cultivos de mango son atacados por la mosca de la fruta; se puede decir que actualmente es el problema fitosanitario más grave del rubro. Son moscas de colores, las hembras poseen un ovipositor esclerotizado que les permite perforar el pericarpio y depositar sus huevos en la piel del fruto luego, estos al eclosionar, penetran el pericarpio y se alimentan de la pulpa deteriorando todo el fruto (Mosca de la fruta, 2022). Estas plagas y otros acontecimientos de índole natural como inundaciones o sequías, de igual modo las de tipo antropogénico, pueden

provocar decaimiento en la producción en la producción de esta y otras frutas, de ahí la importancia de estar enterados considerar ciertas soluciones a estos problemas.

La cantidad de producción dependerá de las estrategias en el cultivo, asegurando que el árbol se encuentre en buen manejo de plaguicidas, abonos, riego entre otros aspectos. Los frutos cosechados en huertos deben tener ciertas características, es decir, deben estar en el punto de madurez apto para ser capaz de elevar su contenido de azúcares, transformar su firmeza y color de manera homogénea a niveles que lo hagan comercialmente aceptable (Villanueva, 2016). La calidad intrínseca de los frutos de mango, además de su manejo postcosecha, son características importantes para una exitosa comercialización y su consumo posterior por parte de clientes cada vez más exigentes a dichos parámetros. El nivel de madurez es un factor crítico tanto para el importador como para el minorista, quienes consideran que es necesario mejorar la tecnología utilizada, tanto precosecha como postcosecha, para lograr una definición más precisa del nivel óptimo de calidad (García-Robles *et al.*, 2018).

Para el procesamiento de los subproductos se emplea la pulpa del mango como materia prima, en la elaboración de mermeladas, jaleas, pulpa deshidratada con chile, salsas con chile habanero y fertilizante, esto se debe a que en el mercado no se comercializa la fruta procesada en forma de conserva, solamente es consumida como fruta fresca. El propósito de la elaboración de productos es que sean apreciados por los consumidores e incluidos en sus dietas.

Este cultivo se desarrolla en sistemas de alta productividad y comercialización, destacando en estados como Guerrero, Veracruz, Michoacán, Chiapas, Oaxaca, Campeche, Jalisco, Sinaloa y Nayarit, entre otros. Sin embargo, en las zonas del sureste de México existe una amplia producción del fruto del mango criollo, debido a esto se tiene una pérdida en utilidades por la falta de conocimiento sobre los diversos usos que se le puede dar al fruto.

El periodo de cosecha de mango durante los meses de mayo, junio y julio, genera una elevada competencia, bajos precios y poca rentabilidad. Esta acumulación de producto requiere estrategias y alternativas a todos los niveles dentro de la cadena producto-mango que permitan canalizar adecuadamente el fruto, de manera que se capitalice el esfuerzo de los productores. La ausencia de estrategias y alternativas diseñadas para atender las necesidades de la situación, con frecuencia provoca acumulación del producto en las huertas, lo que conlleva, además de pérdidas económicas para los fruticultores y problemas fitosanitarios, dado que los frutos no son cosechados, estos quedan en el árbol induciendo así, el desarrollo de todo tipo de plagas y enfermedades que pueden generar graves problemas para el huerto y para toda la cadena de valor (Villanueva, 2016).

Durante los años 2006-2015 hubo abundante cosecha de este fruto en el Estado de Campeche; para el 2023 se presentó una producción récord de mango en México, sin embargo, en 2024, la sequía afectó la producción de mango en varias regiones de México, incluyendo Campeche, lo que llevó a una menor disponibilidad de fruta y aumento de precios, impactando negativamente la actividad de producción. (Ireta-Paredes *et al.*, 2021); (Producción récord de mango en México, 2023).

Por ello, en la presente investigación se proponen diferentes técnicas de aprovechamiento que se le pueden dar al fruto, de esta forma proporcionar una alternativa adicional a los consumidores que no les resulte agradable consumirla en su estado natural pero que puedan incluirlas en sus dietas. Además de plantear, métodos que benefician al cultivo como la cáscara y semilla que terminan siendo desperdicios, lo que contribuye a un problema ambiental y sanitario, propagando la producción de insectos y malos olores.

Materiales y Métodos

A partir de la pulpa extraída de esta variedad de mango criollo, se obtuvieron los siguientes productos: salsa habanero-mango y jalea, mientras que con la cáscara y semillas se elaboró biofertilizante. Para la jalea y salsa se realizaron análisis organolépticos y bromatológicos, al biofertilizante solo se realizaron los bromatológicos.

Salsa de mango-habanero

Para elaborar la salsa de mango-habanero se emplearon 300 g de pulpa de mango criollo, además de adicionar diferentes especias y sazónadores; previamente fue necesario lavar y desinfectar la fruta, retirar la cáscara y semillas,

se mezcló con 50 g de chiles habaneros y otros condimentos para su cocción a una temperatura de 80°C por cinco minutos, posteriormente la salsa fue envasada al vacío (0.70 bar) en frascos de 500 g, esterilizados y etiquetados, conservándose a temperatura ambiente. Posteriormente la salsa fue evaluada por diferentes catadores (17 panelistas) a través de encuestas, en donde se analizaron las características organolépticas del producto.

Jalea

Para la elaboración de la jalea se empleó pulpa de mango criollo 500 g; la fruta fue lavada y desinfectada, retirando la cáscara y semillas, se trituró la fruta por dos minutos, se agregó 400 g de azúcar como conservador, 100 ml de agua y 5 g de pectina en polvo, para obtener la consistencia deseada de jalea, cocinándose a una temperatura de 80°C, por 20 min. El producto fue envasado al vacío (600 mmHg) en recipientes estériles de 500 g, etiquetados. Se realizaron encuestas para conocer sus propiedades organolépticas.

Biofertilizante

El biofertilizante fue elaborado a base de cáscara y semilla del mango criollo, ya que la cáscara representa del 15-20% aproximadamente del peso de la fruta y la semilla con un 35 al 60%, cabe señalar que normalmente tanto la cáscara como la semilla se consideran desechos ya que no se le da algún uso y no hay tecnología necesaria para su aprovechamiento. Las semillas y cáscaras fueron secadas previamente al sol por un periodo de 30 días, para eliminar la mayor cantidad de agua. La humedad final que presentó fue de 12 %. Posteriormente, se utilizó un horno de charolas para finalizar su secado por medio de aire caliente a 45-60°C.

Una vez secas las muestras, se trituraron hasta obtener un polvo fino, la granulometría final fue de 4 mm, colocándose en bolsas herméticas de 4 g, selladas al vacío, para evitar la humedad por el ambiente. Se etiquetaron, indicando el nombre del producto y fecha de elaboración para posteriormente poder ser empleado como abono para la tierra de las plantas haciendo fértil el cultivo por su alto contenido de nutrientes. Se conservándose en un lugar fresco y seco a temperatura ambiente.

Resultados y Discusión

Análisis organolépticos

Los análisis organolépticos son de gran importancia para la industria alimentaria, ya que ayudan a proporcionar información del alimento, mediante encuestas que contemplan preguntas relacionadas con las características organolépticas, como la apariencia, textura, olor color, y sabor según los objetivos del estudio. Estas evaluaciones se llevan a cabo para eliminar o minimizar los efectos de factores externos dándole una garantía de calidad y seguridad al alimento (Lawless y Heyman, 2010).

Los productos elaborados fueron sometidos a una evaluación sensorial por parte de un grupo diverso de catadores. El objetivo fue analizar sus características organolépticas y determinar el nivel de aceptabilidad de cada producto. Para ello, se aplicaron encuestas (escala hedónica de 7 puntos), a un total de 17 participantes, entre ellas amas de casa, microempresarios, estudiantes y trabajadores en alimentos, con edades de 18 a 55 años de edad, partir de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

Sabor: Del total de las personas encuestadas, el 53% indica que el sabor de los productos es muy aceptable, mientras que el 44% señalan que es aceptable. Sin embargo, el 2% establecen que el sabor presentado es normal y solo 1% identifican como desagradable el sabor de los productos.

Color: El color es otro de los parámetros evaluados en donde el 51% de las personas perciben un color normal en todos los productos. El 18% un color claro y el 29% una tonalidad oscura, en cambio solo el 2% de los encuestados indican un color muy oscuro.

Olor: El 44% de los encuestados determinan un olor muy aceptable en los productos elaborados, de tal forma que el 32% perciben un aroma aceptable. De manera que el 21% indica una esencia normal y únicamente el 3% un olor desagradable.

Textura: Para el parámetro de la textura se clasificaron en 6 grupos diferentes, en donde el 47% identifican texturas normales en los productos. El 35% perciben que la textura es espesa mientras que el 10 % la describe como blanda, solo el 5% de los encuestados determinan texturas liquidas y el 3% lo determinan como duras.

Aceptabilidad: Uno de los indicadores más importantes a evaluar es la aceptabilidad de los productos, ya que la aceptación o el rechazo del alimento es el resultado de la interacción entre el alimento y el consumidor en un momento determinado. De modo que el 59% de las personas encuestadas determinan que los productos presentados tienen un nivel muy aceptable, mientras tanto el 40 % lo determina como aceptable y únicamente el 1% como poco aceptable. Por lo cual, se establece que los productos son aceptados.

Análisis bromatológicos

Las determinaciones bromatológicas son importantes pues permiten conocer la composición nutricional, la calidad y la seguridad de los alimentos, pues indican información relevante sobre su contenido en macronutrientes, micronutrientes y posibles contaminantes, garantizando que los alimentos cumplan los estándares establecidos por las reglas sanitarias, además de ser una herramienta valiosa en el desarrollo de nuevos productos alimenticios (Villanueva., 2016). Para el presente trabajo los análisis bromatológicos se realizaron por triplicado

Los resultados obtenidos en estos análisis fueron comparados con productos similares disponibles en el mercado, con el propósito de evaluar si el nuevo producto cumple con las características nutricionales adecuadas para cada uno de sus componentes. Este análisis comparativo también permitió adquirir un conocimiento más profundo sobre la composición cualitativa y cuantitativa de los alimentos, lo cual contribuye a garantizar la calidad y seguridad del producto final para los consumidores.

Proteínas

La determinación del porcentaje de proteínas en los productos es un método que se basa en la transformación del nitrógeno en sulfato de amonio, mediante la acción del ácido sulfúrico a altas temperaturas en presencia de catalizadores y su posterior liberación en forma de amoníaco para proceder a su valoración. Para calcular el porcentaje de nitrógeno en los productos se empleó el método Kjeldahl mediante la siguiente ecuación:

$$\% N = \frac{(N)(V)(0.014)}{m} \times 100 \quad (1)$$

Donde: %N es porcentaje de nitrógeno en la muestra, N es normalidad de ácido titulado, V es volumen gastado de ácido (ml), m es peso de la muestra (g)

En donde el porcentaje de proteína será, el por ciento de nitrógeno obtenido por el factor correspondiente como lo estipula la NOM-F-68-S-1980.

El factor de conversión es un parámetro que pasa el contenido en nitrógeno a contenido en proteínas. La mayoría de las proteínas contienen un 16% de N, de modo que el factor de conversión es 6,2525. En la Tabla 1 se indican los resultados obtenidos del contenido de proteínas en los productos.

Tabla 1. Porcentaje de proteínas

Producto	N	V	m	% nitrógeno	% proteína
Jalea	0.1	1.9	2	0.13	0.8312
Salsa	0.1	1.7	2	0.12	0.7437
Fertilizante	0.1	6.8	2	0.48	2.9750

Humedad

La humedad en los alimentos tiene como función la generación de microorganismos, provocando su descomposición y por lo tanto la pérdida de la calidad sanitaria. Por ello, el porcentaje de humedad nos indica la pérdida en peso por evaporación que sufre el producto al someterlo a las condiciones prescritas. Este análisis se realizó por el método gravimétrico, se utilizó horno de secado, de acuerdo a la norma NOM-116-SSA1-1994

El porcentaje de humedad se obtiene utilizando la ecuación 2:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \times 100 \quad (2)$$

Donde: m_1 es peso de la cápsula (g), m_2 es peso de la capsula de porcelana con muestra seca (g), m_3 es peso de la muestra (g).

Los resultados de humedad de los productos se muestran en Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de humedad

Producto	m_1	m_2	m_3	% humedad
Jalea	800	273	670	78.66
Salsa	627	269	497	72.03
Fertilizante	512	399.7	474	30.06

Grasas

Para la realización del análisis de contenido de grasas en los productos se llevó a cabo mediante el método Soxhlet en donde el proceso inicia a partir de una muestra previamente seca, para evitar que el agua se combine con el disolvente y altere la prueba. La muestra pasa por un proceso de extracción en caliente con un solvente adecuado, después de que el extracto se haya secado a un peso constante, el contenido total de grasa se determina mediante ecuación 3, de acuerdo a la norma NMX-F-545-1992.

$$\% \text{ de grasas} = \frac{PG - PV}{PM} \times 100 \quad (3)$$

Donde: PG es peso del matraz con grasa (g), PV es peso del matraz sin grasa (g), PM es peso de la muestra (g)

En Tabla 3 se indica el porcentaje de grasas de los productos:

Tabla 3. Porcentaje de Grasas

Producto	PG	PV	PM	% grasas
Jalea	123.022	123.013	3	0.30
Salsa	123.019	123.013	3	0.20
Fertilizante	123.025	123.013	3	0.53

Vida de anaquel

Uno de los parámetros más importantes de todo producto alimenticio es la vida de anaquel. Esta corresponde al tiempo que el producto mantiene su calidad desde el momento de manufactura hasta su comercialización y consumo. Los productos elaborados fueron analizados con la finalidad de determinar su duración y poder estimar una caducidad, ya que, al no contener ningún tipo de aditivo o conservador, la vida de anaquel de estos puede ser no muy extensa y poner en riesgo su calidad y la salud de los consumidores. A continuación, se presentan los resultados de vida de anaquel de

los productos, en donde se conservaron a temperatura ambiente y en refrigeración de 3° C, después de haber sido abierto el envase.

Jalea de mango

Las muestras de jalea de mango se conservaron a temperatura ambiente, de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 4. Tiempo de vida de anaquel de la jalea de mango

Temperatura ambiente (Frasco cerrado)		Temperatura ambiente (Frasco abierto)	
Muestra 1	Días 155	Muestra 1	Días 38

Salsa de mango

El tiempo de vida de anaquel que presentó la salsa de mango se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Tiempo de vida de anaquel de la salsa mango-habanero

Temperatura ambiente		Refrigeración 3°C	
Muestra 1	Días 7	Muestra 1	Días 7

Biofertilizante

Este tipo de biofertilizante se elaboró a base de cáscara y semilla de mango fue envasado en bolsas herméticas, y puestas en conservación a temperatura ambiente para evitar el desarrollo de microorganismos provocados por la humedad. Obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 6. Tiempo de vida de anaquel de biofertilizante

Temperatura ambiente		Refrigeración 20°C	
Muestra 1	Días 30	Muestra 1	Días 30

El biofertilizante obtenido fue observado por un periodo de 162 días, en los cuales los primeros 30 días el fertilizante permaneció sellado. Una vez abierto el empaque se llevó a cabo un control de calidad por 132 días, en los cuáles no se observó presencia de humedad ni de microorganismos.

Conclusiones

El mango criollo (*Anacardiaceae*) es un fruto a menudo subvalorado y considerado residuo agrícola en el sureste de México, posee un alto potencial nutritivo y económico. Este estudio demostró la factibilidad de aprovechar integralmente el fruto —incluidas cáscara y semilla— para elaborar jalea, salsa habanero-mango y un biofertilizante, con bajos costos de producción y buena aceptación sensorial, lo que abre oportunidades de ingreso para comunidades rurales.

Los análisis fisicoquímicos confirmaron que los productos presentan calidad e inocuidad adecuadas, con una vida de anaquel superior a un mes tanto a temperatura ambiente como en refrigeración. El biofertilizante, obtenido a partir

de la fracción sólida residual, mostró características favorables como nutriente para cultivos, constituyéndose en una alternativa sostenible frente a fertilizantes químicos.

Finalmente, el trabajo evidencia que el aprovechamiento del mango criollo puede contribuir a la economía circular, reducir residuos y promover prácticas agrícolas más ecológicas, con potencial de replicarse en otras regiones productoras de frutas tropicales.

Agradecimientos y financiamiento: Un agradecimiento a la Universidad Autónoma del Carmen de Ciudad del Carmen, Campeche, México, la facilidad para realizar la parte experimental en los laboratorios de la Facultad de Química. Para el desarrollo de este proyecto no hubo algún tipo de financiamiento.

Bibliografía

- Agrotrapiche. (2022, 21 de octubre). *La cochinilla, una de las principales plagas en mango*. <https://agrotrapiche.com/cochinilla-en-mango/#comments>
- Durán Trujillo, Y., Gabriel Otero, G., Ortega-Arenas, L. D., Arriola Padilla, V. J., Mora Aguilera, J. A., Damián-Nava, A., & García-Escamilla, P. (2017). Evaluación de insecticidas para control de trips y ácaros plagas del mango (*Mangifera indica* L.) en tierra caliente, Guerrero, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(3), 381–394. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93953814008.pdf>
- García-Robles, J. M., Mercado-Ruiz, J. N., & Báez-Sañudo, R. (2018). Calidad y vida de anaquel de mango (*Mangifera indica* L.) tratado con 1-MCP y recubrimiento comestible. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 19(2). <https://www.redalyc.org/journal/813/81357541006/81357541006.pdf>
- Gómez, G., & Guzmán, O. (2019). *Alternativas de valorización para el residuo de mango (Mangifera indica L.) mediante el uso de biotecnología tradicional en el departamento del Atlántico* (Tesis de licenciatura). Universidad Libre Seccional Barranquilla. <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/17819>
- Ireta-Paredes, A. del R., Bautista-Ortega, J., Pérez Hernández, P., & Sánchez-Galván, F. (2021). La producción de mango (*Mangifera indica* L.) en Campeche, México. En L. O. Rodríguez González (Coord.), *Primero el campo. Experiencias multidisciplinarias del sector rural* (pp. 55–69). Universidad de Guadalajara. https://www.researchgate.net/publication/387730225_La_produccion_de_mango_Mangifera_indica_L_en_Campeche_Mexico
- Lawless, H. T., & Heymann, H. (2010). *Sensory evaluation of food: Principles and practices*. Springer.
- Maldonado Astudillo, Y. I., Navarrete García, H. A., Ortiz Morales, O. D., Jiménez Hernández, J., Salazar López, R., Alia Tejacal, I., & Álvarez Fitz, P. (2016). Propiedades físicas, químicas y antioxidantes de variedades de mango crecidas en la Costa de Guerrero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(3), 207–214. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802016000300207&script=sci_abstract&tlng=pt
- Monteón-Ojeda, A., Damián-Nava, A., Cruz Lagunas, B., Durán-Trujillo, Y., Piedragil Ocampo, B., Grifaldo-Alcántara, P. F., Hernández-Castro, E., & García-Escamilla, P. (2020). Efficacy of botanical and biorational insecticides for thrips control (Thysanoptera: Thripidae) in mango trees in Veracruz, México. *Revista Bio Ciencias*, 7, e1031. <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e1031>
- Mosca de la fruta. (2022). <https://www.ecosur.mx/mosca-de-la-fruta-cause-danos-irreversibles-en-la-produccion/>
- Producción récord de mango en México. (2023). *TLC Magazine México*. <https://tlcmagazinemexico.com.mx/index.php/2024/01/05/mexico-produce-una-cantidad-record-de-mangos-en-2023/>
- Ramírez Pérez, J. I. (2015). *Caracterización del jugo de mango (Mangifera indica) variedad criollo obtenido por licuefacción enzimática* (Tesis de licenciatura). Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/829/51150.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- SAGARPA. (2022, 27 de octubre). *Mango mexicano*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257078/Potencial_Mango.pdf
- Villanueva Rodríguez, S. J. (2016). *Introducción a la tecnología del mango*. CONACYT. <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/388/1/Libro%20Mango.pdf>

Biosorción de verde de malaquita en soluciones acuosas por biomasa inactiva de *Bacillus thuringiensis* HD-181

Adrian G. Rodríguez-Villarreal, Luz A. Hernández-Martínez, Guadalupe Rojas-Verde, Katiushka Arévalo-Niño, Verónica Almaguer-Cantú *

Instituto de Biotecnología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, N. L., México

* Autor de correspondencia: veronica.almaguerct@uanl.edu.mx

Contaminación de suelo, agua y aire.

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 27 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.615>

Resumen: En este estudio se evaluó la capacidad de la biomasa inactiva de *Bacillus thuringiensis* HD-181 para la decoloración del colorante verde de malaquita (VM) en soluciones acuosas. El VM es un tinte trifenilmetano de uso común en la industria textil y acuícola, cuyo vertido representa un riesgo ambiental y sanitario debido a su persistencia y toxicidad. Para el desarrollo experimental, la cepa se cultivó en condiciones controladas en fermentador de operación batch, obteniéndose biomasa bacteriana inactiva que fue sometida a ensayos de adsorción. Se aplicó una metodología de superficie de respuesta (RSM) que involucra la concentración inicial de colorante (28–100 ppm), la temperatura de incubación (10–40 °C) y la cantidad de biomasa (10 y 20 mg). Los resultados mostraron una remoción máxima del 90.42% en condiciones óptimas de 25 ppm, 20 mg de biomasa y 40°C. Los datos de cinética se ajustaron al modelo de pseudo-segundo orden ($R^2=0.999$), lo que sugiere un mecanismo de quimiosorción. Asimismo, las isotermas de adsorción se ajustaron preferentemente a los modelos de Langmuir ($q_{max} = 410.48 \text{ mg/g}$; $R^2=0.999$) y Freundlich ($R^2=0.996$), lo que indica una adsorción en monocapa sobre superficies heterogéneas. En conjunto, los resultados confirman el potencial de la biomasa de *B. thuringiensis* HD-181 como un biosorbente eficiente y sustentable para la eliminación de colorantes trifenilmetano en aguas residuales.

Palabras clave: verde de malaquita, biosorción, biomasa inactiva, *Bacillus thuringiensis*, modelos cinéticos

Biosorption of malachite green in aqueous solutions for inactive biomass from *Bacillus thuringiensis* HD-181

Abstract: This study evaluated the ability of inactive biomass of *Bacillus thuringiensis* HD-181 to decolorize malachite green dye from aqueous solutions. Malachite green is a triphenylmethane dye widely used in textile and aquaculture industries, whose discharge poses significant environmental and health risks due to its persistence and toxicity. The bacterial strain was cultured under controlled batch fermentation conditions, and the inactive biomass was subjected to adsorption assays. Response surface methodology (RSM) was applied considering initial dye concentration (28–100 ppm), incubation temperature (10 – 40°C), and biomass amount (10 and 20 mg). Results showed a maximum removal of 90.42% under optimal conditions (25 ppm, 20 mg biomass, 40°C). Kinetic data adjusted the pseudo-second-order model ($R^2=0.999$), suggesting a chemisorption mechanism. Adsorption isotherms fitted mainly to Langmuir ($q_{max} = 410.48 \text{ mg/g}$; $R^2=0.999$) and Freundlich ($R^2=0.996$) models, indicating monolayer adsorption on heterogeneous surfaces. Overall, these findings highlight the potential of *B. thuringiensis* HD-181 biomass as an efficient and sustainable biosorbent for removing triphenylmethane dyes from wastewater.

Keywords: Malachite green, biosorption, inactive biomass, *Bacillus thuringiensis*, Kinetic models

Introducción

El verde malaquita (VM) es un colorante trifenilmetano ampliamente utilizado en la industria textil, en procesos de teñido, así como en la acuicultura como agente antimicótico para el control de saprolegniasis. En los procesos de teñido en textiles se registra que hasta un 50% de los tintes no son fijados a las fibras lo que provoca su liberación en los efluentes industriales. El vertido de estos residuos representa una problemática ambiental de gran relevancia y en bajas concentraciones generan un color intenso que provoca turbidez. Esto reduce la penetración de luz e inhibe la fotosíntesis en ecosistemas acuáticos (Abu-Hussien *et al.*, 2022).

Además, la exposición al verde malaquita puede inducir a alteraciones graves a la salud humana como: daños en el cerebro, riñón, hígado y efectos cancerígenos o mutagénicos a nivel somático (Ashraf *et al.*, 2019).

Debido a su alta estabilidad y resistencia a la degradación, diversos estudios han explorado la capacidad de algunos microorganismos para decolorar o degradar los colorantes del grupo trifenilmetano. Entre las cepas reportadas se encuentran *Aeromonas hydrophila*, *Arthrobacter sp*, *Bacillus subtilis*, bacterias del género *Citrobacter*, *Exiguobacterium sp* MG2 y *Pseudomonas sp*. YB2, principalmente aisladas por métodos tradicionales. Sin embargo, es importante continuar con investigaciones que permitan esclarecer las rutas metabólicas implicadas en la degradación de estos compuestos y evaluar estrategias más eficientes para su eliminación (Song *et al.*, 2020).

Actualmente, se utilizan procesos fisicoquímicos en el tratamiento de efluentes como la coagulación-floculación, adsorción, oxidación y técnicas de membrana, los cuales generan lodos, implican costos adicionales y; producen subproductos indeseables. La biorremediación se postula como una alternativa por su rentabilidad y cuidado al medio ambiente (Sghaier *et al.*, 2019).

Diferentes estudios han demostrado el potencial de bacterias del género *Bacillus* en la remoción de colorantes. Por ejemplo, Hasan *et al.* (2024) prepararon un consorcio de biomasa seca de *Bacillus licheniformis* AG3 y *Bacillus cereus* M116 al 0.01% con la intención de remover verde malaquita y plomo en aguas residuales, presentando resultados de un máximo de 99.35% y 96.01% en 6 h, respectivamente. De manera similar, Cheriaa *et al.* (2012) reportaron un consorcio de 4 cepas bacterianas (*Agrobacterium radiobacter*, *Bacillus spp*, *Sphingomonas paucimobilis* y *Aeromonas hydrophila*) para degradar y decolorar colorantes trifenilmetano con una eficiencia del 91% para cristal violeta y del 99% para verde malaquita en 2 h, sin la formación de productos mutagénicos. Respecto a la capacidad de *Bacillus thuringiensis*, Olukanni *et al.* (2021) utilizaron una cepa bacteriana de *B. thuringiensis* RUN1 para decolorar verde malaquita a 40 ppm en aguas residuales simuladas en los que se obtuvieron resultados de decoloración de $84.67 \pm 1.19\%$ en 6 h, mediante procesos que se pueden relacionar con la decoloración por producción de enzimas como lacasas o reductasas por *B. thuringiensis*.

En este contexto, el presente estudio se centra en la evaluación del potencial de la biomasa inactiva de la cepa *Bacillus thuringiensis* HD-181 por su mecanismo de interacción con el colorante (adsorción) debido a sus características; segura, recuperable y reproducible, así como su fácil almacenamiento, distribución y menor costo. Por otro lado, la biomasa activa involucra condiciones de almacenamiento y utilización más estricta.

Bacillus thuringiensis HD-181 se propone como una cepa prometedora para la decoloración de verde malaquita en soluciones acuosas por su capacidad de adsorción y remoción de moléculas contaminantes. De esta manera, el presente trabajo busca aportar evidencia sobre la eficacia de esta cepa y la ampliación del conocimiento sobre su posible aplicación en estrategias de biorremediación de efluentes industriales contaminados con colorantes trifenilmetano.

Materiales y Métodos

Reactivación de la cepa de trabajo

Se reactivó la cepa de *Bacillus thuringiensis* HD-181 a partir de un cultivo criopreservado en glicerol (50%) a -20°C , mediante un shock térmico inicial a 95°C por 1 min y enfriamiento a 4°C durante 5 min, con el fin de inducir la activación de esporas y asegurar la selectividad del cultivo frente a posibles contaminantes sensibles al calor. Posteriormente, se tomó 20 μL e inoculó a 10 mL de caldo nutritivo (BD Bioxon®). Se incubó a 30°C a 100 rpm por 24 h, seguido de la siembra de placas con agar nutritivo crecidas a la misma temperatura para después almacenarse ambos cultivos a 4°C para los siguientes ensayos.

Producción de biomasa en fermentador en modo de operación batch

Se prepararon 10 L de medio caldo tripticaseína y fosfato (CTP) BD Bioxon® (29.5 g/L) con de agua bidestilada. El pH se ajustó antes de esterilizar a 7.6 y se adicionó 500 μL de solución antiespumante. El medio preparado se colocó en un fermentador de 14 L y se esterilizó en autoclave Yamato® a 120°C (15 psi) por 15 min. Para el pre-inoculo, se prepararon 100 mL del medio CTP y se esterilizó bajo las mismas condiciones.

Se sembró el pre-inoculo con 1 mL (1% v/v) del cultivo de *B. thuringiensis* HD-181 en caldo nutritivo almacenado a 4°C y se incubó por 18 h a 30°C y 100 rpm. Una vez crecido el microorganismo se inocularon los 100 mL del pre-inoculo (OD 600 nm = 0.1) en el fermentador de 14L (1% v/v). El crecimiento de *B. thuringiensis* HD-81 se desarrolló a una temperatura de 30°C a 65 rpm de agitación. El desarrollo bacteriano se monitoreó por: densidad óptica a 600 nm, cambios en el pH del medio de cultivo y observación al microscopio óptico.

El cultivo se extendió por un periodo de 22 h hasta alcanzar una OD600 = 1.68 y la aparición de esporas (fase estacionaria). El crecimiento se detuvo por enfriamiento a 4°C y centrifugación continua a 10,000 rpm a 4°C durante 30 min. La biomasa microbiana fue separada del sobrenadante por decantación y filtrado. Se secó en horno a 55°C por 48-72 h. El producto bacteriano seco se trituró en mortero y posterior tamizaje para obtener un polvo de la biomasa inactiva seca.

Optimización de la decoloración con biomasa inactiva de *B. thuringiensis* HD-181

Se realizó el ensayo de optimización para obtener una superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés) mediante un diseño estadístico con 3 factores: concentración de colorante (28, 50 y 100 ppm), temperatura de incubación (10, 25 y 40°C) y cantidad de biomasa (10 y 20 mg). La optimización se inició mediante pesaje de los tubos con biomasa en balanza analítica. Los ensayos se realizaron por triplicado al iniciarse con la adición de los colorantes a las diferentes concentraciones de trabajo. Cada tubo se incubó a las temperaturas de estudio por un periodo de 2 h con agitación oscilatoria a 100 rpm. Una vez transcurrido el tiempo se centrifugaron a 7800 rpm a 0°C durante 10 min. La cuantificación del VM se realizó en el espectrofotómetro de UV/Vis ThermoScientific® *Evolution 60S* a 620 nm. Se determinó la concentración inicial (C_o), la concentración en el equilibrio (C_e) al tiempo indicado y el cálculo del % de remoción de la biomasa.

$$\% \text{ Remoción} = 100 \left(\frac{C_o - C_e}{C_o} \right) \quad (1)$$

Finalmente, los resultados se analizaron estadísticamente mediante un ANOVA con el paquete estadístico “*read XL*” en *R studio*. El RSM se elaboró con el software *Phyton (JupyterLab)* y fue empleado para representar el proceso de optimización para ambas cantidades de biomasa microbiana empleada (10 y 20 mg).

Tabla 1. Diseño experimental para el RSM de la optimización de la adsorción de VM con biomasa inactiva

Variable	Niveles		
Temperatura (°C)	10	25	40
Cantidad de biomasa (mg)	10	20	
Concentración de VM (mg/L)	28	50	100

Cinética de adsorción de VM con biomasa inactiva

El ensayo de adsorción de VM se desarrolló para determinar la velocidad y el comportamiento de la adsorción de este colorante en el material adsorbente. Se prepararon tubos con biomasa obtenida del ensayo de optimización, así como, las condiciones de concentración de trabajo y temperatura con mayor % remoción de VM en solución (20 mg, 40°C y ~25 ppm de VM). Los ensayos se monitorearon durante tiempos consecutivos por un lapso de 3 h. La adsorción se monitoreo de manera indirecta por absorbancia a 620 nm en espectrofotómetro de UV/Vis ThermoScientific® *Evolution 60S*, de igual manera se reportó la concentración residual y el % de remoción. Los datos se modelaron de acuerdo con modelos cinéticos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden, difusión intrapartícula y Elovich.

Isoterma de adsorción del VM

Se desarrollaron isotermas de adsorción para evaluar la capacidad de adsorción máxima de VM por la biomasa inactiva, así como, obtener una aproximación mediante modelos matemáticos del comportamiento de la adsorción del colorante y las posibles interacciones que se dan entre el adsorbente y el colorante. Se prepararon soluciones de trabajo de 10, 25, 50, 100, 200 y 300 ppm de VM. Los ensayos se desarrollaron bajo las condiciones de optimización de

temperatura, la biomasa empleada (optimización) y el tiempo de equilibrio práctico obtenido del ensayo de la cinética de adsorción previa. El ensayo se detuvo por separación de la biomasa inactiva de la solución mediante centrifugación a 7800 rpm a 0°C durante 10 min y su ulterior cuantificación en el espectrofotómetro de UV/Vis ThermoScientific® Evolution 60S a una longitud de onda de 620 nm.

Los datos obtenidos se ajustaron para obtener los parámetros de concentración inicial, concentración en equilibrio (mg/L) y la q_e (mg/g). Con esto se hizo un ajuste de los modelos matemáticos para isotermas de adsorción, mediante los modelos representados en la Tabla 2.

Tabla 2. Representación de los modelos de isoterma empleados en el ensayo

Modelo	Significado	Ecuación general	Forma linealizada	Gráfico
<i>Langmuir</i>	Supone adsorción en monocapa sobre una superficie homogénea con sitios equivalentes.	$q_e = \frac{(q_{max} k_1 C_e)}{(1 + k_1 C_e)}$	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{(k_1 q_{max})} + \frac{C_e}{q_{max}}$	$\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e
<i>Freundlich</i>	Adsorción en superficies heterogéneas con diferentes energías; multicapa.	$q_e = K_f \cdot F C_e^{(1/n)}$	$\ln q_e = \ln K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \ln C_e$	$\ln q_e$ vs $\ln C_e$
<i>Temkin</i>	Considera que el calor de adsorción disminuye linealmente con la cobertura superficial.	$q_e = \left(\frac{RT}{b_T}\right) \ln(A_T C_e)$	$q_e = B \ln C_e + B \ln A_T$, con $B = \frac{RT}{b_T}$	q_e vs $\ln C_e$
<i>Halsey</i>	Describe adsorción en multicapas y superficies heterogéneas, aplicable a rangos amplios de concentración.	$q_e = \exp \left[\left(\frac{1}{n}\right) \ln K_H - \left(\frac{1}{n}\right) \ln C_e \right]$	$\ln q_e = \left(\frac{1}{n}\right) \ln K_H - \left(\frac{1}{n}\right) \ln C_e$	$\ln q_e$ vs $\ln C_e$
<i>Harkins-Jura</i>	Considera la existencia de superficies heterogéneas y formación de multicapas.	$\frac{1}{q_e^2} = \frac{B}{A} - \left(\frac{1}{A}\right) \ln C_e$	$\frac{1}{q_e^2} = \frac{B}{A} - \left(\frac{1}{A}\right) \ln C_e$	$\frac{1}{q_e^2}$ vs $\ln C_e$

Resultados y Discusión

Modelo de superficie de respuesta (RSM) y la optimización de los parámetros de adsorción

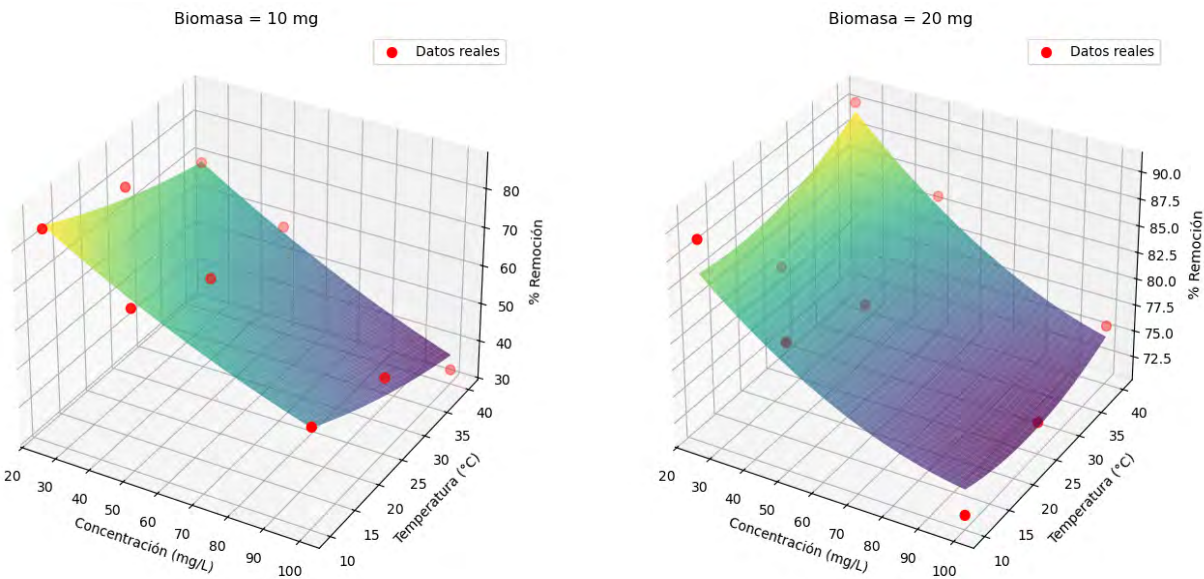
La Tabla 3 muestra los porcentajes de remoción de VM en solución acuosa por la biomasa de *B. thuringiensis* HD-181 mediante un diseño experimental de 3 factores como paso inicial en la optimización de las condiciones. Esto permitió analizar el impacto inicial de la concentración de VM, el contacto a diferentes temperaturas y la cantidad de biomasa empleada, en un sistema constante de 120 min y agitación a 100 rpm. Las tasas de remoción máxima y mínima fueron de 90.42% y 33.25%, respectivamente. La mayor eficiencia de adsorción de colorante se obtuvo con de 20 mg de biomasa inactiva, una concentración inicial del VM de 25 ppm y a una temperatura de 40°C.

El análisis de varianza de 3 factores de estudio mostró una diferencia altamente significativa entre los porcentajes de remoción. Demuestra que la temperatura, la cantidad de biomasa y concentración inicial de colorante tienen un efecto importante en la remoción de VM. Esto concuerda con lo reportado en la literatura, en el sentido de que, a mayores concentraciones del colorante, menor es el porcentaje de rendimiento debido a la saturación de la biomasa (Mawad *et al.*, 2021). No obstante, la prueba de Tukey demostró que no existe interacción entre la concentración y la temperatura lo que sugiere que sus efectos pueden ser independientes.

En contraste, la cantidad de biomasa con la temperatura y la concentración sí muestran una interacción en la remoción de VM en solución. En el caso de la temperatura, no hubo diferencias significativas entre 25 y 40°C en la remoción de colorante, pero sí a 10°C se obtuvieron valores de remoción elevados a bajas concentraciones de colorante. La adsorción en materiales orgánicos ha mostrado igualmente una similitud entre la remoción a temperaturas entre 20 y 40°C (Muinde *et al.*, 2017). Se ha reportado una disminución significativa en la adsorción de VM en biomasa seca al elevar la temperatura sobre 30°C (303 K), lo que difiere con lo obtenido en el presente ensayo (Saravanan *et al.*, 2025).

Tabla 3. Resultados del diseño experimental para la optimización de la remoción de VM por la biomasa inactiva de *B. thuringiensis* HD-181

Concentración (mg/L)	Temperatura (°C)	Cantidad de biomasa (mg)	Remoción (%)	Rem. Predicho (%)
25	40	20	90.42	90.06
25	10	20	89.17	86.52
25	10	10	84.54	86.1
50	40	20	83.66	83.27
50	10	20	82.26	80.61
25	25	20	80.53	86.65
50	25	20	79.37	80.3
25	25	10	78.87	76.68
100	40	20	75.88	75.68
100	25	20	73.26	73.6
100	10	20	71.60	74.79
50	10	10	71.33	74.27
25	40	10	69.56	70.54
50	25	10	61.63	64.39
50	40	10	58.49	57.8
100	10	10	55.74	56.59
100	25	10	49.48	45.82
100	40	10	33.25	38.33



$R^2 = 0.970 \mid \text{ajustado } R^2 = 0.936$

Figura 1. a) Superficie de respuesta (3D) para 10 y 20 mg de biomasa bacteriana, que representa el % de remoción de VM de acuerdo con la interacción de la concentración inicial de VM (mg/L) y la temperatura de incubación (°C)

El modelado de los resultados obtenidos mediante el diseño de optimización para la adsorción de VM por la biomasa (Figura 1) que representa un modelo de superficie de respuesta nos da una comprensión integral de los efectos individuales y en conjunto que pudieran tener las variables independientes (temperatura, concentración de VM y biomasa) en relación con la variable dependiente que en el presente ensayo fue el % de Remoción que es reflejo de la capacidad de adsorción de la biomasa microbiana.

El modelo de superficie tiene un R^2 de 0.970, lo que explicaría en un 97% la relación entre la concentración inicial del colorante y la temperatura en la adsorción de VM por una cantidad determinada de biomasa. Dicho modelo se representa mediante el sistema de superficie modelado (ecuación 2), no obstante, fue necesario el ajuste que representara de mejor manera para cada concentración de biomasa de 10 y 20 mg, desarrollados en la ecuación 3 y 4, respectivamente.

$$\% \text{ Remoción} = 110.95 - 0.819C - 1.489T - 0.001B + 0.002C^2 - 0.001C \cdot T + 0.024C \cdot B + 0.07T^2 + 0.064T \cdot B - 0.039B^2 \quad (2)$$

$$\% \text{ Remoción}_{10} = 107.749 - 0.5815C - 0.8538T + 0.0016C^2 - 0.0012C \cdot T + 0.0073T^2 \quad (3)$$

$$\% \text{ Remoción}_{20} = 95.878 - 0.3446C - 0.2177T + 0.0016C^2 - 0.0012C \cdot T + 0.0073T^2 \quad (4)$$

Esto se relaciona con lo propuesto en la literatura por Hasan *et al.* (2024) sobre adsorción también de VM por biomasa inactiva de cepas de *Bacillus licheniformis* y *Bacillus cereus* donde también se obtuvo una diferencia altamente significativa ($p < 0.001$) para la influencia de la concentración de VM, la cantidad de biomasa y en su caso la influencia del pH, que este último no se evaluó en el presente estudio. No había efecto en la variación de la temperatura de su estudio (30 y 40°C) lo que difirió en el presente ensayo al observarse diferencia significativa en las temperaturas evaluadas (10, 25 y 40°C).

Cinética de adsorción de VM en condiciones optimas

La cinética de adsorción de VM (Figura 2) permitió evaluar de manera práctica la velocidad de remoción en la biomasa inactiva de *B. thuringiensis* HD-181 y el comportamiento teórico mediante modelos matemáticos del colorante al interactuar con dicho adsorbente. Para ello se desarrolló este proceso a las condiciones de remoción derivadas del ensayo de optimización previo, donde se mostró una eficiencia mayor a una temperatura de 40°C, cantidad de biomasa de 20 mg/L y una concentración de VM de 25 ppm, en diferentes tiempos de contacto de la biomasa. El ajuste de dichos datos es significativo comparado con otras condiciones de remoción.

Se observa en la Figura 2 una remoción en equilibrio alrededor del 85%, donde la curva de la gráfica se estabilizó y la adsorción por la biomasa fue mínima, no obstante, el ajuste lineal de los datos mediante los valores determinados de k_2 y q_e (Tabla 4) permitieron calcular el tiempo de equilibrio para alcanzar las fracciones de 95 y 99% de adsorción que fueron de 70.07 y 365.13 min con las condiciones de remoción optimizadas (20 mg, 25 ppm VM y 40°C).

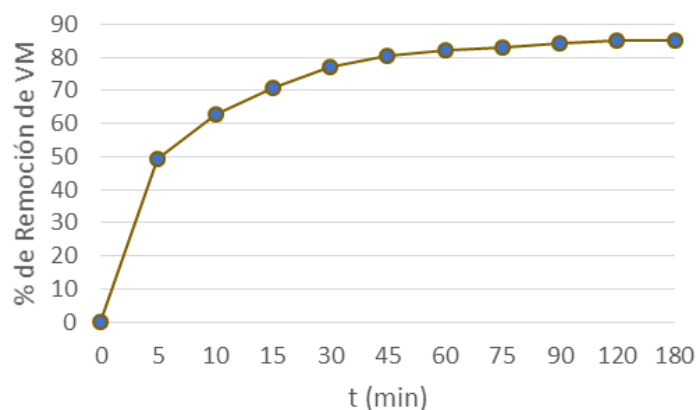


Figura 2. Cinética de remoción de verde de malaquita a las condiciones óptimas de 25 ppm, 40°C y 20 mg de biomasa inactiva

Tabla 4. Modelos cinéticos de adsorción ajustados a los datos de la cinética de adsorción de VM

Pseudo 1° orden		Pseudo 2° orden		Elovich		Difusión intraparticular	
R^2	0.940	R^2	0.999	R^2	0.902	R^2	0.634
q_e (mg/g)	2.462	q_e (mg/g)	12.78	α (mg/g·min)	19.72	C (mg/g)	5.30
k_1 (g/mg·min)	0.0234	k_2 (g/mg·min)	0.021	β (g/mg)	0.304	k_{id} (g/mg/min)	0.739

La Tabla 4 representa los ajustes a los modelos matemáticos más comunes para interpretar los procesos de sorción por biomasa o compuestos sorbentes, el mejor valor de ajuste de R^2 fue el modelo de pseudo-segundo orden lo que sugiere que la velocidad de decoloración o sorción está limitada por la interacción entre los sitios activos de la biomasa inactiva de *B. thuringiensis* y el VM, lo que concuerda con un mecanismo de quimiosorción. Se ha reportado que biomazas microbianas como *Bacillus cereus* también se ajustan a modelos de pseudo-segundo orden, pero en las concentraciones de VM diferentes de 50, 100 y 400 ppm con q_e de 65.49, 133 y 324.7 mg/g, respectivamente (Jayashree & Ray, 2015). Lo cual dificulta establecer una comparación directa de la capacidad de adsorción de dicha biomasa con la del presente caso.

Del mismo modo, el valor calculado de q_e mediante el modelo de pseudo-segundo orden (12.78 mg/g) fue muy cercano al experimental de (12.65 mg/g), lo que refuerza la validez del modelo, el cual se muestra en la Figura 3. En contraste, el modelo de pseudo-primero orden subestima q_e (2.46 mg/g), lo que sugiere que no representa correctamente la cinética del sistema. Este modelo se ha reportado para procesos de degradación, por lo que su aplicación va comúnmente con procesos de óxido-reducción, fotocatalisis, nanocompositos magnéticos o carbón activado (Al-Wasidi & Abdelrahman, 2025; Kebir *et al.*, 2015; Odoemelam *et al.*, 2018). El modelo de difusión intraparticular presentó un intercepto distinto de cero, lo que indica que la difusión interna no constituye el único paso limitante del proceso; el transporte externo también participa en la cinética global del sistema.

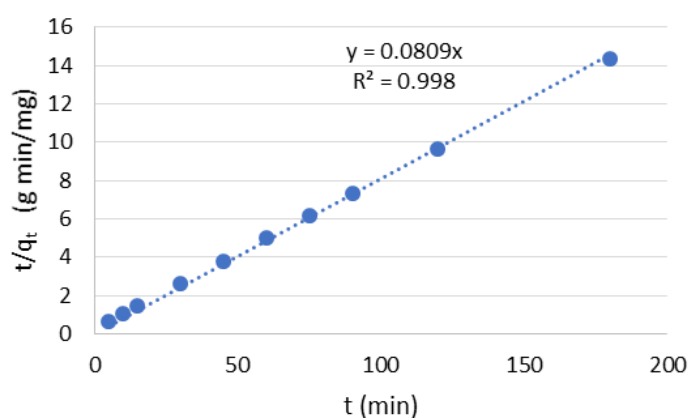


Figura 3. Ajuste al modelo de cinética de pseudo-segundo orden en la remoción de VM con biomasa inactiva de *B. thuringiensis* HD-181

Isotermas de adsorción en equilibrio de VM

Diferentes modelos isotérmicos, como son Freundlich, Langmuir, Harkins-Hura, Halsey y Temkin (Tabla 2), fueron aplicados para determinar la máxima capacidad de remoción de VM por la biomasa inactiva de *Bacillus thuringiensis* HD-181. Los resultados de los ajustes matemáticos con sus principales variables modeladas se muestran en la Tabla 5.

El modelado de las isotermas de adsorción de VM a 25 mg/L sobre 20 mg de biomasa en incubación a 40°C, permitió un ajuste preferente con los modelos de Langmuir ($R^2 = 0.999$) y Freundlich ($R^2 = 0.996$). De manera independiente el modelo de Langmuir nos indica la formación de una monocapa en el proceso de adsorción en la superficie de la biomasa en tanto que el modelo de Freundlich ($n > 1$) explica que la adsorción es favorable e indica que a medida que aumenta la concentración del sorbato consecuentemente la cantidad adsorbida también aumenta. Similar a ello, Freundlich nos indica diferentes energías en el modelo o superficies heterogéneas que pudiera promover que el adsorbato se adhiriera

al adsorbente, pero de manera variada de acuerdo con sus sitios de interacción. Los modelos de Temkin y Harkins-Jura no describen adecuadamente el comportamiento real del sistema de adsorción, lo que dificulta la interpretación fiable de parámetros derivados, ejemplificado con la relación entre el calor de adsorción y la superficie como en el caso del modelo de Temkin.

Tabla 5. Resumen de los valores obtenidos del ajuste de las isotermas de adsorción a modelos

Modelo	Parámetro	Valor obtenido
Langmuir	q_{max} (mg/g)	410.48
	K_L (L/mg)	0.003
	R^2	0.999
Freundlich	K_F (L/g)	1.227
	n	1.092
	R^2	0.996
Temkin	K_T (L/mg)	6.3×10^{13}
	B (J/mol)	0.0181
	R^2	0.8895
Harkins-Jura	A	17.13
	B	1.68
	R^2	0.64

Es importante destacar la q_{max} obtenida mediante el modelo de Langmuir de 410.48 mg/g que muestra la alta capacidad de adsorción total teórica de la biomasa microbiana, coincide con el reporte de Jayashree & Ray (2015) con *Bacillus cereus* donde muestran q_{max} de 485 mg/g y un K_L de 0.01. No obstante, no presentan buen ajuste con Freundlich pero si con otro modelo que también les permite interpretar las irregularidades de la adsorción; así mismo podemos analizar dichos valores como menos eficientes que materiales como carbón o material vegetal.

Los estudios de Bullen *et al.* (2021) y Lee *et al.* (2021), ayudan a entender que es un parámetro variante entre el tipo de material adsorbente, la cantidad usada y la concentración empleada. En concordancia con la cinética de pseudo-segundo orden, los resultados indican que la tasa de remoción está controlada por la disponibilidad de sitios activos, lo que confirma el alto potencial del biosorbente para la eliminación de VM bajo las condiciones estudiadas.

Conclusiones

La biomasa inactiva de *Bacillus thuringiensis* HD-181 demostró un alto potencial para la remoción de VM con eficiencias de hasta 90.42% bajo condiciones óptimas.

El ajuste de la remoción por la biomasa inactiva a un modelo de respuesta de superficie presentó un $R^2 = 0.97$, lo que muestra buena relación en la explicación del sistema de adsorción.

La cinética de sorción se ajustó mejor al modelo de pseudo-segundo orden, lo que indica un proceso de quimiosorción dependiente de los sitios activos de la biomasa.

El modelo de Langmuir mostró una capacidad máxima de adsorción teórica de 410.48 mg/g, que se asemeja a diferentes tipos de biomasa de naturaleza similar.

Los resultados suponen que la biomasa de *B. thuringiensis* HD-181 puede emplearse como una alternativa sustentable y de bajo costo en la biorremediación de efluentes industriales contaminados con colorantes trifenilmetano.

Agradecimientos y financiamiento: Al Instituto de Biotecnología de la Facultad de Ciencias Biológicas por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación, que fue financiada con el proyecto 116-BYQ-2024 de la convocatoria ProACTI 2024.

Bibliografía

- Abu-Hussien, S. H., Hemdan, B. A., Alzahrani, O. M., Alswat, A. S., Alatawi, F. A., Alenezi, M. A., Darwish, D. B. E., Bafhaid, H. S., Mahmoud, S. F., Ibrahim, M. F. M., & El-Sayed, S. M. (2022). Microbial degradation, spectral analysis and toxicological assessment of malachite green dye by *Streptomyces exfoliatus*. *Molecules*, 27(19), 6456. <https://doi.org/10.3390/molecules27196456>
- Al-Wasidi, A. S., & Abdelrahman, E. A. (2025). Efficient remediation of malachite green dye utilizing novel and straightforwardly constructed nanocomposite. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102(9), 101994. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2025.101994>
- Ashraf, M. W., Abulibdeh, N., & Salam, A. (2019). Selective removal of malachite green dye from aqueous solutions by supported liquid membrane technology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18), 3484. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183484>
- Bullen, J. C., Saleesongsom, S., Gallagher, K., & Weiss, D. J. (2021). A Revised Pseudo-Second-Order Kinetic Model for Adsorption, Sensitive to Changes in Adsorbate and Adsorbent Concentrations. *Langmuir*, 37(10), 3189-3201. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00142>
- Cheriaa, J., Khairredine, M., Rouabhia, M., & Bakhrouf, A. (2012). Removal of triphenylmethane dyes by bacterial consortium. *The Scientific World Journal*, 512454. <https://doi.org/10.1100/2012/512454>
- Hasan, M. I., Bag, S., Halder, D., Bhowmik, S., Chakraborty, A., & Ghosh, A. (2024). Simultaneous removal of malachite green and lead from water by consortium dry-biomasses of *Bacillus licheniformis* AG3 and *Bacillus cereus* M116. *Scientific Reports*, 14(1), 19707. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70658-2>
- Jayashree, N., & Ray, L. (2015). Biosorption of malachite green from aqueous solution by dry cells of *Bacillus cereus* M116 (MTCC 5521). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 386–394. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.12.022>
- Kebir, M., Trari, M., Maachi, R., Nasrallah, N., Bellal, B., & Amrane, A. (2015). Relevance of a hybrid process coupling adsorption and visible light photocatalysis involving a new hetero-system CuCo2O4/TiO2 for the removal of hexavalent chromium. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 548-559. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.12.024>
- Lee, J. H., Sim, S. J., Kang, J. H., & Choi, S. S. (2021). Isotherm and thermodynamic modelling of malachite green on CO2-activated carbon fibers. *Chemical Physics Letters*, 780, 138962. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.138962>
- Mawad, A., Albasri, H., & Temerk, H. A. (2021). Biosorption of Malachite Green by Dry Cells of Isolated Free Living Nitrogen Fixing Bacteria. *Nature Environment And Pollution Technology*, 20(3). <https://doi.org/10.46488/nept.2021.v20i03.030>
- Muinde, V. M., Onyari, J. M., Wamalwa, B., Wabomba, J., & Nthumbi, R. M. (2017). Adsorption of Malachite Green from Aqueous Solutions onto Rice Husks: Kinetic and Equilibrium Studies. *Journal Of Environmental Protection*, 08(03), 215-230. <https://doi.org/10.4236/jep.2017.83017>
- Odoemelam, S. A., Emeh, U. N., & Eddy, N. O. (2018). Experimental and computational chemistry studies on the removal of methylene blue and malachite green dyes from aqueous solution by neem (*Azadirachta indica*) leaves. *Journal of Taibah University for Science*, 12(3), 255–265. <https://doi.org/10.1080/16583655.2018.1465725>
- Olukanni, O. D., Adenopo, A., Awotuta, A. O., & Osuntoki, A. (2013). Biodegradation of malachite green by extracellular laccase producing *Bacillus thuringiensis* RUN1. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 9, 543–549. <https://doi.org/10.6000/1927-5129.2013.09.70>
- Saravanan, A., Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Yuvaraj, D., Karishma, S., Mathan Muthu, C. M., Thasleema Nasrin, M. R., Aarthi Sree, G., Karthik, V., Natrayan, L., & Rangasamy, G. (2025). Adsorption performance and modelling of malachite green dye removal from aqueous solution using sulphuric acid-modified *Ipomoea pes-caprae* biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15, 341–357. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05067-y>
- Sghaier, I., Guembri, M., Chouchane, H., Mosbah, A., Ouzari, H. I., Jaouani, A., & Cherif, M. (2019). Recent advances in textile wastewater treatment using microbial consortia. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 5(3), 134–146. <https://doi.org/10.15406/jteft.2019.05.00194>
- Song, J., Han, G., Wang, Y., Jiang, X., Zhao, D., Li, M., Yang, Z., Ma, Q., Parales, R., Ruan, Z., & Mu, Y. (2020). Pathway and kinetics of malachite green biodegradation by *Pseudomonas veronii*. *Scientific Reports*, 10, 4502. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61442-z>

Estudio termodinámico de un ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto con cinco disoluciones diferentes

Cristofer Uriel Torres-Rodríguez ¹, Iván Hernández-Pérez ^{2,*}, Manuel Adolfo Custodio-Barragán ³ y Luis Enrique Angeles-Montero ⁴

¹ Estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México.

² Profesor-Investigador de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México.

³ Egresado de Ingeniería Mecánica Eléctrica, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México.

⁴ Técnico Académico del Laboratorio de Mecatrónica, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México.

* Autor de correspondencia: ivan.hernandezp@ujat.mx; Tel.: (+52) 9931184015.

Desarrollo Sustentable (Ahorro de Recursos en Procesos Industriales)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 27 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.616>

Resumen: Se presenta un estudio del comportamiento de diferentes disoluciones basadas en la mezcla agua + bromuro de litio ($H_2O+LiBr$) en un ciclo de refrigeración por absorción de simple efecto. A estas disoluciones se les han agregado otras sales inorgánicas con intención de mejorar sus propiedades. Aunque existe información acerca de las propiedades de las mezclas: 1) $H_2O + LiBr + LiNO_3 + LiI + LiCl$, 2) $H_2O + LiBr + LiI + LiCl$, 3) $H_2O + LiBr + LiNO_3$, 4) $H_2O + LiBr + LiI$, la información sobre su capacidad de absorción es limitada, lo cual es un indicador favorable para el uso de una solución en el ciclo de refrigeración por absorción. Se hizo una recopilación de las propiedades termodinámicas de estas mezclas y se determinaron los valores de entalpía de cada una de ellas. Además, se realizó un análisis termodinámico de su comportamiento en un ciclo de simple efecto de refrigeración por absorción. Se encontró que la disolución $H_2O + LiBr + LiI$ presenta una eficiencia ligeramente mayor que el sistema $H_2O + LiBr$ debido a que tiene una mejor capacidad de absorción, además esta es menos propensa a cristalizar que el sistema convencional. La mezcla $H_2O + LiBr + LiNO_3 + LiI + LiCl$ se comporta de manera similar que el sistema anterior y la mezcla $H_2O + LiBr + LiI + LiCl$ resultó ser la más eficiente.

Palabras clave: absorción, bromuro de litio, ciclo de refrigeración

Thermodynamic study of a single-effect absorption refrigeration cycle with five different solutions

Abstract: A study of the behavior of different solutions based on the mixture water + lithium bromide ($H_2O+LiBr$) in a single-effect absorption refrigeration cycle is presented. Other inorganic salts have been added to these solutions with the intention of improving their properties. Although there is information about the properties of the mixtures: 1) $H_2O + LiBr + LiNO_3 + LiI + LiCl$, 2) $H_2O + LiBr + LiI + LiCl$, 3) $H_2O + LiBr + LiNO_3$, 4) $H_2O + LiBr + LiI$, the information on their absorption capacity is limited, which is a favorable indicator for the use of a solution in the absorption refrigeration cycle. A compilation of the thermodynamic properties of these mixtures was made and the enthalpy values of each of them were determined. In addition, a thermodynamic analysis of their behavior in a single-effect absorption refrigeration cycle was performed. It was found that the $H_2O + LiBr + LiI$ solution presents a slightly higher efficiency than the $H_2O + LiBr$ system because it has a better absorption capacity, and it is less prone to crystallize than the conventional system. The $H_2O + LiBr + LiNO_3 + LiI + LiCl$ mixture behaves in a similar way to the previous system and the $H_2O + LiBr + LiI + LiCl$ mixture turned out to be the most efficient.

Keywords: Absorption; lithium bromide; Refrigeration cycle.

Introducción

La refrigeración por absorción de simple efecto es un ciclo termodinámico que utiliza una fuente de calor para producir refrigeración, lo que permite aprovechar energía residual y reducir el consumo eléctrico. Uno de los fluidos de trabajo más comunes es la mezcla agua–bromuro de litio ($H_2O-LiBr$), reconocida por su alta capacidad absorbente, la no volatilidad del bromuro de litio y el elevado calor latente del agua. No obstante, este sistema presenta limitaciones como la cristalización y la corrosión, lo que ha impulsado la búsqueda de mezclas alternativas que mejoren su desempeño sin perder sus ventajas.

Diversos estudios respaldan esta línea de investigación. Wang *et al.* (2017) analizaron el desempeño transitorio de un enfriador por absorción activado con diferentes fuentes de calor, observando que la eficiencia depende fuertemente de la temperatura del generador. Rodríguez-Muñoz *et al.* (2024) compararon un sistema de refrigeración por absorción (SRA) convencional con otro con recuperación de calor (SRA-RC), encontrando mejoras del 5.8%–6.3% en el coeficiente de desempeño (COP) y del 3.7%–9.5% en la eficiencia exergética. Posteriormente, Rodríguez-Muñoz *et al.* (2025) evaluaron mezclas alternativas como $\text{CaCl}_2\text{--LiNO}_3\text{--KNO}_3\text{--H}_2\text{O}$ y $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--H}_2\text{O}$, reportando incrementos energéticos del 25%–35% y exergéticos del 10%–36% respecto al sistema convencional. Por su parte, Ren *et al.* (2019) desarrollaron un modelo termodinámico en Matlab para ciclos de absorción con $\text{LiCl--H}_2\text{O}$ y $\text{LiBr--H}_2\text{O}$, concluyendo que la mezcla $\text{LiCl--H}_2\text{O}$ resulta más adecuada en condiciones de baja temperatura de generador. Finalmente, Kadam *et al.* (2020) analizaron nueve mezclas mediante simulaciones en Aspen Plus, mostrando que configuraciones ternarias y cuaternarias presentan un mayor coeficiente global de transferencia de calor y menor riesgo de cristalización.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en el análisis de cuatro disoluciones derivadas del sistema $\text{H}_2\text{O--LiBr}$: (1) $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3 + \text{LiI} + \text{LiCl}$, (2) $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiI} + \text{LiCl}$, (3) $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3$ y (4) $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiI}$. Se recopilieron sus propiedades termodinámicas, se construyeron diagramas entalpía–concentración y se evaluó su desempeño en un ciclo de simple efecto de refrigeración por absorción. Con ello se busca identificar las mezclas con mayor eficiencia y menor susceptibilidad a cristalizar, aportando información útil para el diseño de sistemas de refrigeración por absorción más estables y sustentables.

Materiales y Métodos

Análisis del ciclo de simple efecto para refrigeración por absorción

El ciclo de simple efecto es la configuración más sencilla de los sistemas de refrigeración por absorción. En términos generales, un sistema de absorción consta de cuatro componentes que intercambian energía con el ambiente, además de un intercambiador

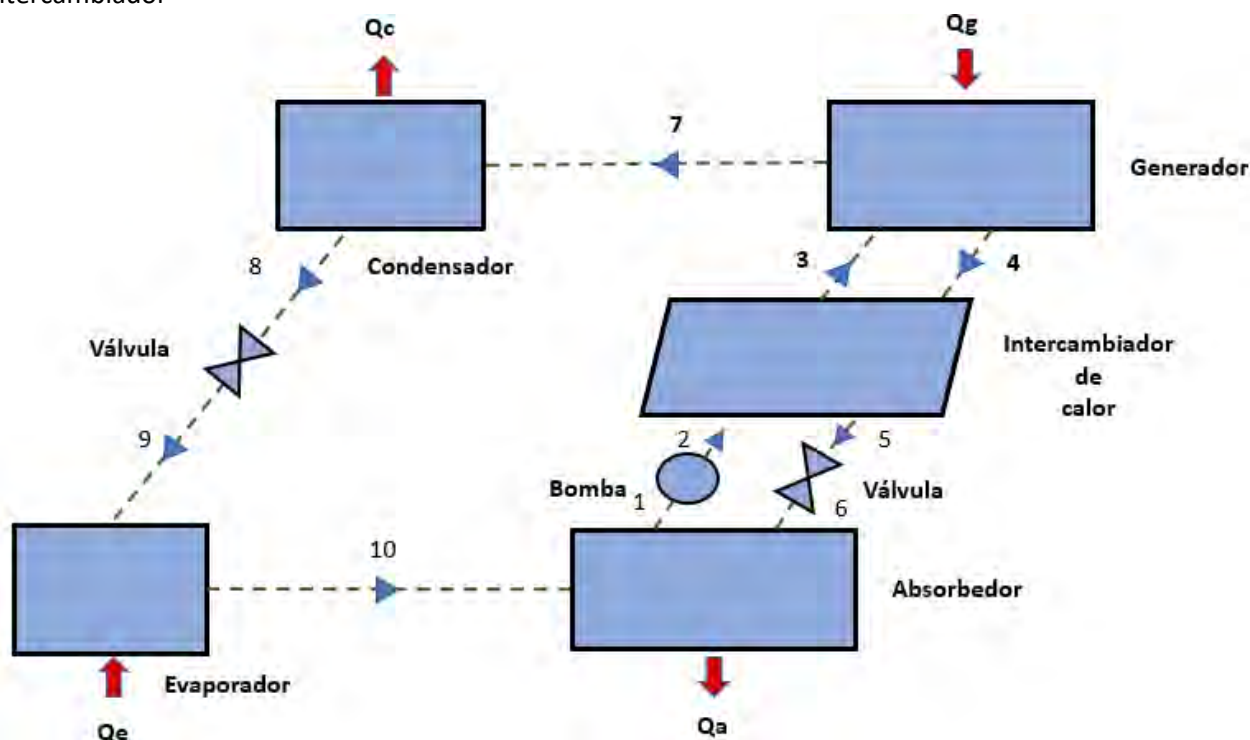


Figura1 Ciclo de simple efecto de refrigeración por absorción

Circuito de solución

El proceso del circuito de disolución consta de una etapa de circulación entre el absorbedor y el generador, esta es bombeada desde el nivel de baja presión del absorbedor hasta el generador cuya presión es alta. En la siguiente etapa,

la disolución dentro del generador recibe calor por medios externos, como una fuente de combustión u otra fuente con una temperatura suficientemente alta. Como resultado, el refrigerante (agua) se separa de la solución y es enviado al condensador. El vapor que sale del generador es libre de sal y se dirige al condensador, mientras que la disolución líquida se concentra en sal y pasa por el intercambiador intermedio transfiriendo calor con la disolución que sale del absorbedor; el propósito de este intercambiador es reducir la carga externa de calor necesaria utilizando la energía disponible en la máquina con un aprovechamiento óptimo.

Circuito de refrigerante

El vapor de refrigerante que sale del generador es dirigido al condensador, donde se licúa expulsando calor a un medio externo. Posteriormente, el líquido subenfriado que sale del condensador es estrangulado por una restricción hasta alcanzar la baja presión. A continuación, el refrigerante en dos fases entra al evaporador, donde se gasifica. Este proceso está acompañado por una transferencia de calor desde el ambiente del evaporador, debido a la baja presión creada en el absorbedor. El incluir el intercambiador intermedio también reduce la cantidad de calor expulsado. Cuando la disolución sale del intercambiador intermedio llega subenfriada a una restricción de flujo, región donde puede ocurrir la cristalización. Cuando el líquido subenfriado es estrangulado por la restricción, algo de vapor se genera a partir del líquido. Luego esta corriente ingresa al absorbedor y la solución concentrada en sales entra en contacto con el vapor suministrado por el evaporador. Dicho proceso de absorción ocurre si el absorbedor es enfriado por una fuente externa. Mientras el vapor es absorbido, la fracción másica de las sales es reducida hasta el mismo nivel que la solución en la entrada del generador.

Análisis del ciclo de simple efecto

Hipótesis de funcionamiento para el ciclo de absorción de simple efecto

El conocimiento de los estados termodinámicos dentro del ciclo es necesario para el análisis del ciclo de simple efecto. Para ello, se consideran las siguientes hipótesis:

- La presión en el evaporador y el absorbedor es la misma ($P_e = P_a$) y también la presión del condensador es igual a la presión que el generador ($P_c = P_g$).
- El vapor de agua a la salida del condensador es un vapor saturado.
- El agua líquida a la salida del condensador es un líquido saturado.
- La disolución concentrada que sale del generador está a la temperatura de ebullición.
- El vapor de agua que sale del generador está a la temperatura de equilibrio de la disolución diluida a P_g , que entra al generador.
- La disolución que sale del absorbedor está saturada
- Los procesos en las válvulas de expansión son isoentálpicos.
- No se consideran pérdidas térmicas en equipos y conductos.
- El trabajo de la bomba de circulación es isentrópico.
- El ciclo opera en régimen estacionario.

Modelo matemático

Condiciones de operación del ciclo de absorción de simple efecto

El ciclo es considerado como un sistema refrigerado por aire, ya que las temperaturas en el absorbedor y en el condensador son de aproximadamente 10 °C, una temperatura considerablemente mayor a un sistema enfriado por agua donde se requiere una torre de enfriamiento. Esto se debe a los bajos coeficientes de transferencia de calor del aire. Tal como se muestra en la Tabla 1, se conoce la temperatura de evaporación (T_{10}), la temperatura de la solución a la salida del absorbedor (T_1), la temperatura de condensación (T_8), la efectividad del intercambiador solución-solución (ε), la temperatura de la solución a la salida del generador (T_4) y el flujo másico de refrigerante (m_1).

Análisis del ciclo

Las temperaturas de evaporación y condensación permiten calcular los dos niveles de presión del ciclo de simple efecto, de esta manera se encuentran los valores de presión baja $P_{low} = 1.42$ kPa y presión alta $P_{high} = 12.34$ kPa

Para el cálculo de la concentración de la solución pobre y de la solución rica en absorbente, se han utilizado las correlaciones de presión de vapor en función de la temperatura y composición.

En la Tabla 1 se muestran todos los datos obtenidos para cada una de las disoluciones. Cabe mencionar que las concentraciones de la solución pobre del absorbente (x_1) obtenidas para las soluciones $H_2O+LiBr+LiI+LiCl$ y $H_2O+LiBr+LiI+LiCl+LiNO_3$ son aproximadas

Tabla 1 Concentración de la disolución pobre y disolución rica en el ciclo de simple efecto

T_{10} (°C)	T_8 (°C)	T_4 (°C)	T_1 (°C)	ϵ	m_1 (kg/s)
9	50	107	50	0.65	1

Nota: T_{10} = temperatura del evaporador; T_8 = temperatura del condensador; T_4 = temperatura del generador; T_1 = temperatura del absorbedor; ϵ = eficiencia del intercambiador de calor solución-solución; m_1 = flujo másico de la solución absorbente.

Balances de energía

Para obtener el COP es necesario realizar los balances de energía. La Tabla 2 muestra los balances de materia y energía impuestos para determinar la solución, los balances de energía se han determinado tanto para el refrigerante como para el absorbente.

Adicionalmente se requiere de la relación de caudales para conocer el flujo masico de la disolución rica y de la disolución pobre en sales a partir del flujo masico de refrigerante (1).

$$f = \frac{m_3}{m_7} = \frac{x_4}{x_4 - x_1} \quad (1)$$

El COP es la medida de la eficiencia del ciclo, definido como la relación de la carga evaporada y la carga aportada al generador (2).

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{m_{10}h_{10} - m_9h_9}{m_4h_4 + m_7h_7 - m_3h_3} \quad (2)$$

La entalpia de las disoluciones ($H_2O + LiBr +$ componentes), fue calculada en una mezcla generalmente representada por una función de temperatura, presión y concentración; sin embargo, la dependencia de la presión en la entalpia de la disolución se desprecia debido a que un sistema de absorción opera con presiones muy bajas.

Cálculo de entalpía de las disoluciones propuestas

Las entalpías de las mezclas: 1) $H_2O + LiBr + LiNO_3 + LiI + LiCl$, 2) $H_2O + LiBr + LiI + LiCl$, 3) $H_2O + LiBr + LiNO_3$, 4) $H_2O + LiBr + LiI$, se determinaron utilizando el método de McNeely. El método de McNeely se basa en una regla empírica conocida como la regla de Duhring que dice: Si el punto de ebullición de una disolución se grafica contra el punto de ebullición de su disolvente a la misma presión, la gráfica resultante será una línea recta. Esta suposición puede ser una limitante del método y en algunos los casos donde se requiera hacer una extrapolación esto podría generar incertidumbre. Se ha validado comparando las entalpías publicadas por McNeely (1979) para la disolución $H_2O+LiBr$ con las entalpías calculadas a partir del método descrito. Se utilizaron las correlaciones de las propiedades del $H_2O+LiBr$ publicadas por Pátek y Klomfar (2006) para construir el diagrama entalpía-concentración y se comparó su similitud con el grafico publicado por McNeely (Figura2). En esta figura se puede apreciar claramente su similitud, entonces las entalpías de las mezclas mencionadas anteriormente se obtuvieron usando el mismo método.

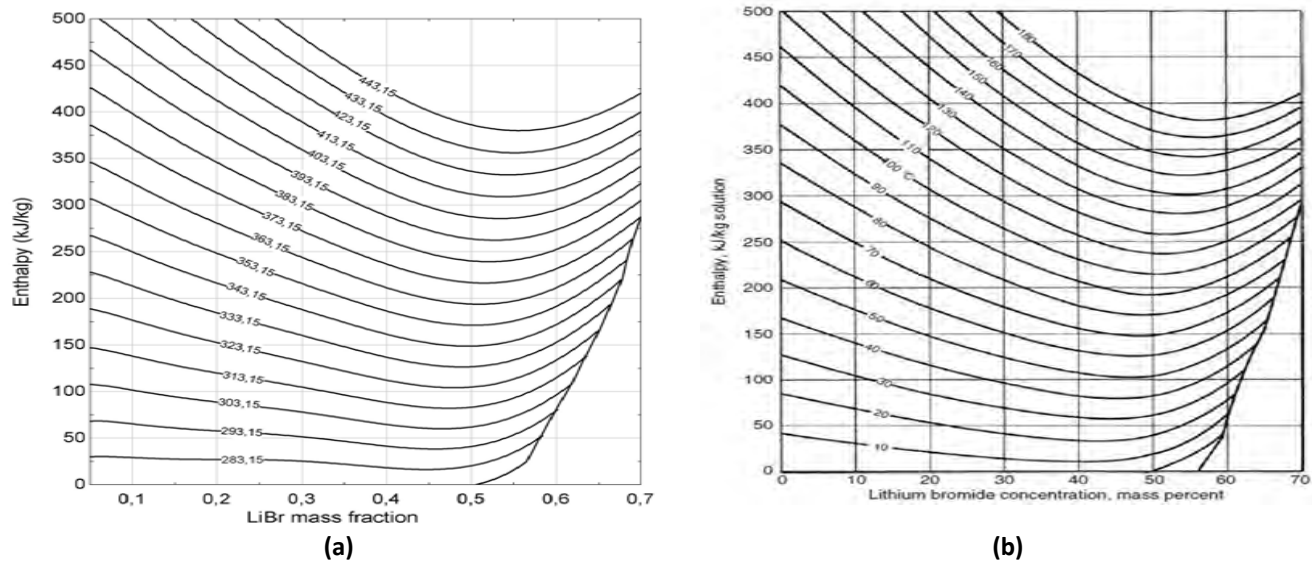


Figura 2. Diagramas de entalpía-concentración: (a) Diagrama constituido para la validación del método
(b) Diagrama publicado por McNeeley

Tabla 2 Balances de materia y energía de los componentes del ciclo de simple efecto

Equipo	Balances de materia	Balance de energía
Bomba	$m^1 - m^2 = 0$ $x_1 - x_2 = 0$	$m_1 h_1 + W_p - m_2 h_2 = 0$
Intercambiador solución-solución	$m^2 - m^3 = 0; m^4 - m^5 = 0$ $x_2 - x_3 = 0; x_4 - x_5 = 0$	$m_2 h_2 + m_4 h_4 - m_3 h_3 - m_5 h_5 = 0$
Válvula expansión de la solución	$m^5 - m^6 = 0$ $x_5 - x_6 = 0$	$h_5 - h_6 = 0$
Absorbedor	$m^{10} + m^6 - m^1 = 0$ $m_{10} x_{10} + m_6 x_6 - m_1 x_1 = 0$	$m_{10} h_{10} + m_6 h_6 - m_1 h_1 - Q_a = 0$
Generador	$m^3 - m^4 - m^7 = 0$ $m_3 x_3 - m_4 x_4 - m_7 x_7 = 0$	$m_3 h_3 - m_4 h_4 - m_7 h_7 + Q_g = 0$
Condensador	$m_7 - m_8 = 0$	$m_7 h_7 - m_8 h_8 - Q_c = 0$
Válvula de expansión del refrigerante	$m^8 - m^9 = 0$ $x_8 - x_9 = 0$	$h_8 - h_9 = 0$
Evaporador	$m^9 - m^{10} = 0$ $x_9 - x_{10} = 0$	$m_9 h_9 + Q_e - m_{10} h_{10} = 0$

Resultados y Discusión

En los ciclos de refrigeración por absorción de simple efecto, la relación de circulación de caudales f es un parámetro que indica la cantidad de solución pobre en sales necesaria para absorber 1 kg/s de refrigerante. Es importante destacar que un valor alto de f indica que las concentraciones de las soluciones rica y pobre son muy cercanas, por lo que es necesario recircular caudales elevados para absorber el refrigerante. En consecuencia, cuanto mayor es esta relación, mayores son los trabajos de las bombas, los diámetros de las tuberías y las pérdidas de calor sensible que se producen en los intercambiadores de calor solución-solución.

Tabla 3 concentración de la disolución pobre y rica en el ciclo de simple efecto

Disolución	X_1 (%)	X_4 (%)	X_{sat} (%)	Δx
$H_2O + LiBr$	60.42	64.40	67.37	2.97
$H_2O + LiBr + LiI$	60.50	64.71	69.55	4.84
$H_2O + LiBr + LiNO_3$	62.40	66.33	69.84	3.51
$H_2O + LiBr + LiI + LiCl$	59.44	63.77	67.91	4.14
$H_2O + LiBr + LiNO_3 + LiI + LiCl$	60.67	64.90	69.10	4.20

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos durante la simulación del ciclo de simple efecto de refrigeración por absorción, en la cual se muestra a la relación de circulación del COP de cada una de las disoluciones. La mezclas $H_2O + LiBr + LiI$ y $H_2O + LiBr + LiNO_3 + LiI + LiCl$ contienen una mayor limitación de cristalización a diferencia de la mezcla convencional ($H_2O + LiBr$). En el caso de la mezcla $H_2O + LiBr + LiNO_3$ se reduce la eficiencia a diferencia de la convencional, pero aumenta su solubilidad. Esto quiere decir que la mezcla $H_2O + LiBr + LiI + LiCl$ resulta ser la disolución más eficiente teniendo un límite de cristalización ligeramente mayor en comparación a la disolución $H_2O + LiBr$.

En estudios recientes se ha observado que los rendimientos (COP) y el rango operativo de los ciclos de absorción con la pareja H_2O – $LiBr$ pueden mantenerse o incluso ampliarse mediante la adición de pequeñas fracciones de otras sales de litio ($LiNO_3$, $LiCl$, LiI) o mediante formulaciones ternarias/cuaternarias, debido a la mayor solubilidad y al desplazamiento del límite de cristalización que permiten operar a concentraciones más elevadas en el absorbedor. Las revisiones y estudios experimentales publicados entre 2020 y 2024 muestran que, en sistemas solares y de aprovechamiento de calor residual, las configuraciones de $LiBr$ – H_2O mantienen COP típicos en el rango ~ 0.6 – 0.8 para unidades de un solo efecto bajo condiciones de diseño habituales, aunque el valor exacto depende fuertemente de las temperaturas de generador/condensador/evaporador y del diseño del intercambiador. En cuanto a las mezclas aditivadas (por ejemplo $LiBr + LiNO_3$ o mezclas $LiBr + LiI + LiNO_3 + LiCl$) se reporta una mejor solubilidad y una menor tendencia a cristalizar, lo que permite trabajar con mayores concentraciones de sales en el absorbedor y, en muchos casos, traducirse en una leve mejora del COP o en una mayor flexibilidad operativa; sin embargo, estas ventajas vienen acompañadas de consideraciones prácticas importantes: cambios en la corrosividad, posibles efectos en la transferencia de masa y calor en los filmes de absorción, y la necesidad de validar compatibilidad con materiales y sellos. Estudios de modelado y campo recientes recomiendan evaluar caso por caso (simulación + pruebas) porque los beneficios termodinámicos de la adición de sales pueden verse compensados por pérdidas adicionales (p. ej. mayor recirculación, mayor bombeo o degradación de intercambiadores) si no se optimiza la relación de recirculación de caudales ni el diseño del absorbedor. En resumen, los trabajos de 2020–2024 confirman la tendencia observada en este trabajo: las formulaciones $H_2O + LiBr + (LiNO_3 / LiI / LiCl)$ permiten mejorar la solubilidad y ampliar la ventana de operación frente a la solución convencional $H_2O + LiBr$, pero requieren un balance entre ganancia termodinámica y consideraciones de corrosión, manipulación y diseño (bombeo/intercambiadores) antes de recomendar su implementación industrial.

Tabla 4 Resultados de la simulación del ciclo de simple efecto

Disolución	f	COP	$\pm \Delta COP$
$H_2O + LiBr$	16.18	0.66	± 0.02
$H_2O + LiBr + LiI$	15.35	0.67	± 0.02
$H_2O + LiBr + LiNO_3$	16.88	0.58	± 0.03
$H_2O + LiBr + LiI + LiCl$	14.72	0.75	± 0.02
$H_2O + LiBr + LiNO_3 + LiI + LiCl$	15.32	0.67	± 0.02

Es importante considerar la incertidumbre asociada a los valores de COP obtenidos en la simulación. Dado que los resultados se calcularon mediante un modelo termodinámico idealizado, la principal fuente de incertidumbre proviene de la precisión de las propiedades termofísicas utilizadas (presión de vapor del refrigerante, entalpías de las soluciones y coeficientes de transferencia de calor). Con base en estudios similares de simulación numérica del ciclo H_2O – $LiBr$ de

simple efecto (Li *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024), la variación típica del COP puede situarse en el rango de $\pm 3\text{--}5\%$ para condiciones de operación cercanas a las nominales.

En este trabajo se asume una incertidumbre estimada de ± 0.02 en el valor de COP para las disoluciones analizadas. Esta variación puede atribuirse a los posibles errores de interpolación en las propiedades termodinámicas y a la sensibilidad del modelo frente a las temperaturas del generador, condensador y absorbedor. En consecuencia, los valores de COP reportados deben interpretarse como resultados promedio del modelo, con una tolerancia inherente propia de los métodos de simulación empleados.

Conclusiones

Se ha hecho una recopilación de correlaciones con el objetivo de analizar las propiedades termodinámicas publicadas en la literatura para las siguientes disoluciones salinas: $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiI}$, $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3$, $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiI} + \text{LiCl}$, $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3 + \text{LiI} + \text{LiCl}$, presión de vapor, densidad, capacidad calorífica y solubilidad de dichas disoluciones.

Simulando un ciclo simple efecto de refrigeración por absorción utilizando cada una de las disoluciones, se concluye que la disolución $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiI}$ presenta una eficiencia ligeramente mayor que el sistema $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr}$ para las condiciones de operación analizadas, esto se debe a que tiene una mejor capacidad de absorción es menos susceptible a cristalizar que el sistema convencional ya que su límite de solubilidad es mayor. La mezcla $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3 + \text{LiI} + \text{LiCl}$ se comporta de manera similar que el sistema anterior y la mezcla $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiI} + \text{LiCl}$ es la más eficiente, sin embargo, se debe mencionar que la concentración de la solución pobre en sales para ambas disoluciones, ha sido obtenida extrapolando las correlaciones de la presión de vapor por lo que estos resultados solo deben considerarse como aproximados entonces se sugiere como trabajo futuro realizar un estudio experimental para validar los resultados obtenidos en ese trabajo. Por último, la mezcla $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr} + \text{LiNO}_3$ resulta ser menos eficiente que la disolución $\text{H}_2\text{O} + \text{LiBr}$ debido a que tiene una capacidad de absorción menor, sin embargo, presenta una mejor solubilidad.

Agradecimientos y financiamiento: El primer autor agradece el apoyo de su Padre El Sr. Luis Torres Jimenez, Madre la Sra. Ana Rodriguez Rodriguez, Hermanos Figo Tristan y Jesus Antonio, a sus amigos Emilio Gallegos Castro, Leonardo Cano Mendez Y demás amistades y personajes que cambiaron la forma de pensar del primer autor así como al Dr. Ivan Alejandro Hernández Pérez.

Bibliografía

- Kadam, S. T., Gkouletsos, D., Hassan, I., Rahman, M. A., Kyriakides, A. S., Papadopoulos, A. I., & Seferlis, P. (2020). Investigation of binary, ternary and quaternary mixtures across solution heat exchanger used in absorption refrigeration and process modifications to improve cycle performance. *Energy*, 198, 117254. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117254>
- Li, Q., Zhao, S., Wang, D., Song, Q., Zhou, S., Wang, X., & Li, Y. (2023). Simulation study on solar single/double-effect switching LiBr–H₂O absorption refrigeration system. *Energies*, 16(7), 3220. <https://doi.org/10.3390/en16073220>
- McNeely, L. A. (1979). *Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide*. <https://nvlpubs.nist.gov/>
- Pátek, J., & Klomfar, J. (2006). A computationally effective formulation of the thermodynamic properties of LiBr–H₂O solutions from 273 to 500 K over full composition range. *International Journal of Refrigeration*, 29(4), 566–578. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.10.007>
- Ren, J., Qian, Z., Yao, Z., Gan, N., & Zhang, Y. (2019). Thermodynamic evaluation of LiCl–H₂O and LiBr–H₂O absorption refrigeration systems based on a novel model and algorithm. *Energies*, 12(15), 3037. <https://doi.org/10.3390/en12153037>
- Rodríguez, J. L., de Jesús Ramírez-Minguela, J., Ituna-Yudonago, J. F., Pacheco-Cedeño, J. S., Zuno-Silva, J., & Borja-Soto, C. E. (2025). Evaluación energética y exergética de un ciclo alternativo de refrigeración por absorción usando mezclas sustitutas al LiBr–H₂O. *Acta Universitaria*, 35. <https://doi.org/10.15174/au.2025.4344>
- Rodríguez-Muñoz, J. L., Pacheco-Cedeño, J. S., Ituna-Yudonago, J. F., Ramírez-Minguela, J. J., & González-Hernández, I. J. (2024). First and second law analysis of a LiBr–water absorption cycle with recovering condensation heat for generation. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 22(6), 1719–1741. <https://doi.org/10.5098/hmt.22.6.1719>
- Wang, J., Shang, S., Li, X., Wang, B., Wu, W., & Shi, W. (2017). Dynamic performance analysis for an absorption chiller under different working conditions. *Applied Sciences*, 7(8), 797. <https://doi.org/10.3390/app7080797>
- Wang, L., He, L., & He, Y. (2024). Review on absorption refrigeration technology and its potential in energy-saving and carbon emission reduction in natural gas and hydrogen liquefaction. *Energies*, 17(14), 3427. <https://doi.org/10.3390/en17143427>

Viabilidad técnica y económica de la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado en Jalpa de Méndez, Tabasco

Kevin S. Olán-Rueda, Daniel A. Córdova-Chablé, Moisés A. Petriz-Prieto y Esveidi M. Valdovinos-García *

División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez (DAMJM), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), Carret. Estatal Libre Villahermosa-Comalcalco km. 27+000 s/n Ranchería Ribera Alta, Jalpa de Méndez, Tabasco, C.P. 86205, México

* Autor de correspondencia: esveidi.valdovinos@ujat.mx

Desarrollo Sustentable (Economía Circular)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 27 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.626>

Resumen: El aceite vegetal usado (AVU) representa un residuo de alto impacto ambiental cuando es desechado inadecuadamente, generando contaminación en suelos y cuerpos de agua. En este estudio se evaluó la viabilidad técnica y económica de la producción de biodiésel a partir de AVU recolectado en el municipio de Jalpa de Méndez, Tabasco. La investigación se desarrolló en tres etapas: estimación del volumen potencial de recolección, producción y caracterización experimental de biodiésel, y simulación del proceso a escala industrial mediante Aspen Plus. Los resultados indicaron que existe disponibilidad significativa de AVU y disposición de los comerciantes para su aprovechamiento. El biodiésel obtenido presentó densidad y poder calorífico dentro de los rangos normativos, aunque la viscosidad fue ligeramente superior (7.50 mm²/s). La simulación mostró una conversión del 98 % y permitió estimar un costo de producción de 0.692 USD por litro, aunque el consumo energético en la etapa de purificación fue elevado. Estos hallazgos evidencian que la valorización del AVU para la producción de biodiésel constituye una alternativa ambientalmente favorable, aunque requiere optimizar la eficiencia energética para mejorar su competitividad económica.

Palabras clave: aceite vegetal usado, biodiésel, simulación de procesos, análisis económico, economía circular

From waste to biofuel: technical and economic feasibility of biodiesel production from used vegetable oil in Jalpa de Méndez, Tabasco

Abstract: Used vegetable oil (UVO) represents a waste stream with high environmental impact when improperly disposed of, leading to contamination of soils and water bodies. In this study, the technical and economic feasibility of biodiesel production from UVO collected in the municipality of Jalpa de Méndez, Tabasco, was evaluated. The research was carried out in three stages: estimation of the potential collection volume, experimental production and characterization of biodiesel, and process simulation at industrial scale using Aspen Plus. The results indicated a significant availability of UVO and a willingness among local vendors to participate in its recovery. The produced biodiesel exhibited density and higher heating value within regulatory limits, although the viscosity was slightly higher (7.50 mm²/s). Process simulation showed a conversion efficiency of 98% and enabled the estimation of a production cost of 0.692 USD per liter; however, energy consumption during the purification stage was relatively high. These findings demonstrate that the valorization of UVO for biodiesel production is an environmentally favorable alternative, although improvements in energy efficiency are required to enhance its economic competitiveness.

Keywords: Used vegetable oil, biodiesel, process simulation, economic analysis, circular economy

Introducción

Actualmente, los problemas ambientales derivados de la mala disposición de residuos son motivo de creciente preocupación. Entre ellos, el aceite vegetal usado (AVU), generado principalmente en actividades de fritura, representa un residuo altamente contaminante cuando es desechado inadecuadamente (Alarcón *et al.*, 2021). Su presencia en cuerpos de agua reduce la transferencia de oxígeno y luz, afectando gravemente los ecosistemas acuáticos y obstruyendo sistemas de alcantarillado debido a su baja biodegradabilidad. En suelos, puede generar una capa impermeable que disminuye la productividad agrícola (Alarcón *et al.*, 2021).

Cuando el aceite vegetal usado (AVU) ya se ha vertido en el suelo o en cuerpos de agua, existen alternativas de tratamiento como la biorremediación (mediante microorganismos, hongos o plantas), el uso de absorbentes naturales o sintéticos, la incineración controlada o el encapsulamiento del residuo (Qadeer *et al.*, 2021). Sin embargo, estas opciones suelen ser técnicamente complejas y económicamente inviables en muchos contextos locales. Por ejemplo, la biorremediación requiere condiciones ambientales controladas (como oxígeno, temperatura adecuada, nutrientes)

y puede tardar muchos meses o años, lo que encarece el proceso e introduce incertidumbres sobre su eficiencia (Alori, Gabasawa, Elenwo, & Agbeyegbe, 2022). El uso de absorbentes sofisticados (como esponjas o polímeros fabricados para separación de aceite) implica altos costos de producción y baja reutilización (Turco *et al.*, 2018). La incineración controlada, aunque elimina el contaminante, demanda instalaciones y filtros especializados para evitar emisiones peligrosas, lo que la hace poco accesible en zonas rurales, tal es el caso de Jalpa de Méndez. El encapsulamiento, en tanto que contiene el residuo aislándolo de su entorno, no elimina el contaminante, de modo que el problema simplemente se traslada, sin resolverlo de forma definitiva.

En respuesta a esta problemática, se han propuesto alternativas para el aprovechamiento del AVU, siendo la producción de biodiésel una de las más destacadas (Torroba, 2020, Campos-Ramírez *et al.*, 2020). Este biocombustible presenta propiedades biodegradables y menores emisiones contaminantes en comparación con el diésel fósil. Diversos estudios reportan reducciones de hasta un 13–21 % en monóxido de carbono y un 11 % en partículas suspendidas al mezclar biodiésel con diésel convencional (Qadeer *et al.*, 2021).

Desde inicios del año 2000, la producción de biodiésel ha incrementado significativamente, especialmente utilizando aceites como palma, soya y colza. No obstante, el AVU ha ganado atención por su bajo costo y disponibilidad, representando una opción viable dentro de esquemas de economía circular, Torroba, 2020. Gracias a sus resultados favorables, el desarrollo del biodiésel ha sido impulsado por políticas públicas y acuerdos internacionales que fomentan el uso de combustibles renovables. De hecho, se estima que las energías renovables representan hoy alrededor del 36 % de la matriz energética global (Torroba, 2020).

En el ámbito de la ingeniería básica de procesos, se utilizan herramientas de simulación como Aspen Plus, que permiten simular etapas de producción y realizar análisis técnicos y económicos para orientar decisiones sobre el escalamiento industrial. Este simulador es ampliamente utilizado en las industrias química y energética debido a su capacidad para modelar, optimizar y analizar costos en procesos complejos (Riojas-González *et al.*, 2022, Campos-Ramírez *et al.*, 2020).

En Jalpa de Méndez, Tabasco, la gastronomía local (particularmente la elaboración de productos fritos como la butifarra, empanadas, panuchos, y antojitos en general) genera grandes cantidades de AVU, el cual en muchos casos no recibe un tratamiento adecuado. Aunque algunos comerciantes entregan el aceite a empresas recolectoras, muchos otros lo desechan directamente en el drenaje o el suelo. Ante esta situación, el presente estudio se planteó como objetivo evaluar el potencial del AVU recolectado en este municipio para la producción de biodiésel, mediante su caracterización experimental y la simulación del proceso productivo para determinar su viabilidad técnica y económica.

Materiales y Métodos

El presente proyecto se desarrolló en tres etapas, la primera fue la estimación de la capacidad de recolección de aceite vegetal usado (AVU) en el municipio de Jalpa de Méndez, la segunda fue la evaluación experimental de la calidad del biodiésel producido a partir del AVU recolectado, y la tercera fue la simulación del proceso de producción a escala industrial para analizar su viabilidad técnica y económica mediante el software Aspen Plus.

Determinación de la capacidad de recolección de aceite usado

Como punto de partida, se aplicó una encuesta a 55 comercios dedicados a la preparación de alimentos en la zona centro de Jalpa de Méndez, municipio de Tabasco, con el objetivo de conocer los volúmenes aproximados de AVU generados y su disposición final. Las encuestas incluyeron preguntas clave como: “¿Donarías el aceite que desechas?” y “¿Dónde desechas el aceite que utilizas?”, lo que permitió identificar tanto la cantidad potencial de AVU disponible como el grado de disposición de los comerciantes para su donación. Durante las visitas, también se recolectaron muestras de aceite usado directamente de los establecimientos, las cuales se emplearon posteriormente en la etapa experimental para la producción de biodiésel.

Producción y caracterización de biodiésel a partir de AVU

La producción experimental de biodiésel se llevó a cabo en laboratorio, mediante tres etapas principales: pretratamiento del AVU, reacción de transesterificación y caracterización del producto. Para el pretratamiento del

aceite usado y recolectado primero se sometió a un proceso de limpieza para eliminar sólidos y compuestos que pudieran afectar la eficiencia de la reacción. Este proceso incluyó filtración del aceite con el fin de retirar partículas sólidas del aceite, posteriormente un lavado con agua destilada a 70°C manteniendo agitación mecánica para eliminar impurezas químicas, y posteriormente se realizó la separación del agua usando un decantador. Finalmente, el aceite filtrado y lavado se sometió a calentamiento para el secado térmico por 2 horas a más de 110°C con el fin de eliminar humedad.

Para la producción de biodiésel se utilizó metanol como alcohol y NaOH como catalizador. Para la reacción química se preparó una solución de metóxido con 0.2 g de NaOH y 20 mL de metanol, se mezclaron con 50 ml aceite (relación molar aproximada aceite:metanol, 10:1) y se mantuvieron en agitación y a 40°C constante durante una hora. Posteriormente, la mezcla se decantó durante 24 horas, separándose en dos fases: glicerina (fase inferior) y biodiésel (fase superior), Figura 1. El biodiésel fue lavado varias veces con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro y finalmente purificado mediante calentamiento para eliminar restos de agua y metanol.

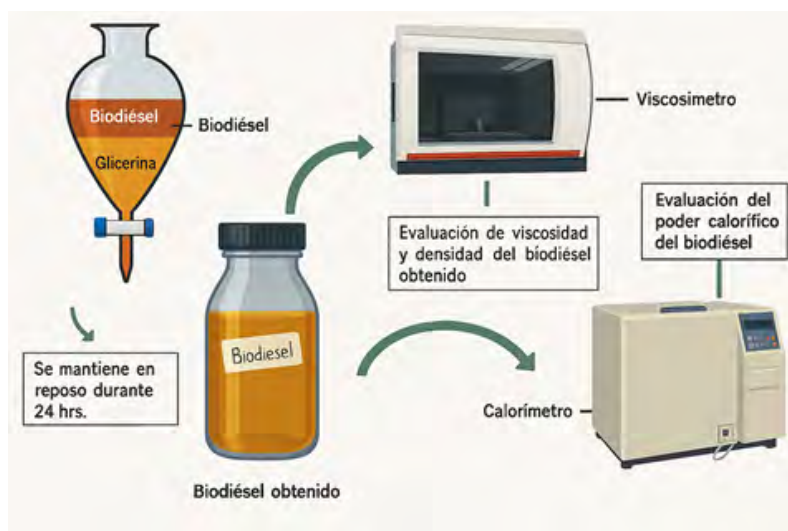


Figura 1. Esquema de seguimiento del biodiésel para la caracterización

El biodiésel se caracterizó (por triplicado) evaluando densidad, viscosidad y poder calorífico, además de realizar la prueba de la flama. La densidad y la viscosidad se determinaron mediante un viscosímetro Stabinger SVM 2001, Anton Parr, el poder calorífico se determinó utilizando un calorímetro adiabático. Para la prueba a la flama se prepararon 3 mecheros caseros, uno se llenó con aceite usado, otro con biodiésel y el tercero con diésel comercial, se encendieron las mechas y se comparó el tamaño de la flama y la cantidad de humo que generó la combustión de cada una de las muestras de combustibles.

Simulación del proceso y análisis Tecnoeconómico

Con base en los resultados experimentales, se simuló el proceso de producción de biodiésel en Aspen Plus v10. Se modelaron las etapas de pretratamiento del aceite usado, transesterificación del aceite y purificación de biodiésel obtenido. Para esta simulación, Figura 2, se consideró una alimentación de 24.232 kg/día de AVU, con una mezcla de 25% metanol y 75% dióxido de carbono como solvente en la reacción.

Para la etapa de pretratamiento se consideró el uso de equipos del simulador tales como filtros separadores de sólidos, mezcladores y tanques flash. En la etapa de transesterificación se utilizó CO₂ como solvente ya que ayuda a mejorar la efectividad de conversión en las reacciones de transesterificación del aceite, y metanol como alcohol primario, la Tabla 1 muestra las reacciones que se usaron para la simulación de esta etapa. El CO₂ es un solvente no tóxico, que puede retirarse fácilmente (por depresión de presión) sin dejar residuos, y en condiciones supercríticas ayuda a reducir los requerimientos de temperatura, presión o exceso de alcohol comparado con métodos que usan solo alcohol o solventes orgánicos tradicionales (Maçaira *et al.*, 2014). Para la simulación de la transesterificación se mezcla el metanol con aceite que ya fue tratado, para ello se usó un Mixer, la mezcla se calienta hasta una temperatura de 40°C

mediante un intercambiador de calor, ya que esta es la temperatura a la cual se llevará a cabo las reacciones principales. Posteriormente la mezcla ya calentada es enviada a un reactor estequiométrico para producir el biodiésel con las reacciones de transesterificación. Se consideró un reactor estequiométrico ya que no se contaban con datos cinéticos.

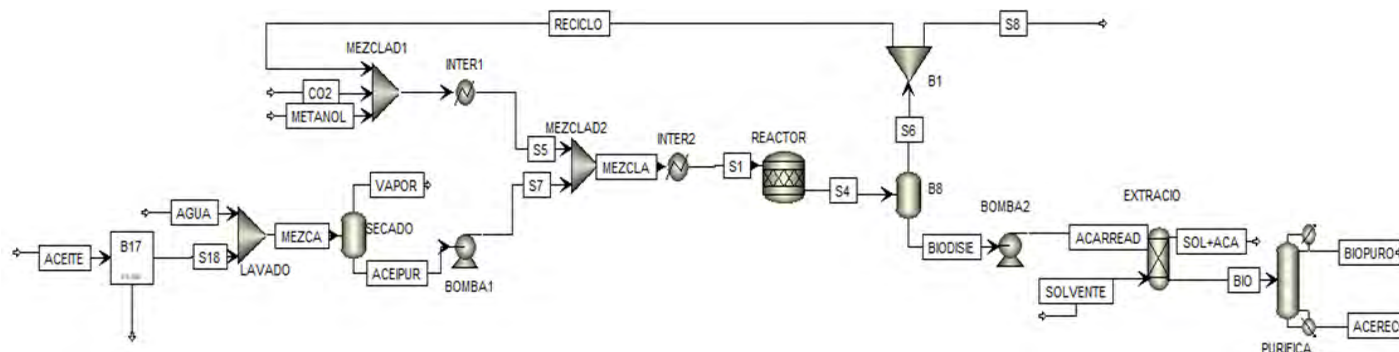


Figura 2. Flowsheet desarrollado en Aspen plus para evaluar la propuesta de producción de biodiésel a partir de aceite vegetal usado (AVU)

Tabla 1. Reacciones de transesterificación que se usaron para la simulación

Reacciones
$C_{57}H_{104}O_6 + 3 CH_3OH \leftrightarrow 3 C_{19}H_{36}O_2 + C_3H_8O_3$ Trioleína + Metanol $\leftrightarrow$ Oleato De Metilo + Glicerina
$C_{57}H_{98}O_6 + 3 CH_3OH \leftrightarrow 3 C_{19}H_{34}O_2 + C_3H_8O_3$ Trilinoleína + Metanol $\leftrightarrow$ Linoleato De Metilo + Glicerina
$C_{51}H_{98}O_6 + 3 CH_3OH \leftrightarrow 3 C_{17}H_{34}O_2 + C_3H_8O_3$ Tripalmitina + Metanol $\leftrightarrow$ Palmitato De Metilo + Glicerina
$C_{57}H_{110}O_6 + 3 CH_3OH \leftrightarrow 3 C_{19}H_{38}O_2 + C_3H_8O_3$ Triestearina + Metanol $\leftrightarrow$ Estearato De Metilo + Glicerina

Para la etapa de purificación la corriente de salida del reactor se envía a un tanque flash el cual se encargó de separar de la mezcla el metanol que no reaccionó y el cosolvente, y para aprovechar estos compuestos se recircularon al reactor. Después de separar el cosolvente y el metanol, la mezcla se envía a una columna de extracción líquido-líquido, ya que de esta mezcla se necesita separar la glicerina que se produjo como subproducto en las reacciones de transesterificación. La columna de extracción liquido-liquido opera inicialmente con un total de 8 etapas y utiliza agua como solvente. Por último, la mezcla biodiesel-aceite después de salir de la columna de extracción liquido-liquido fue enviada a una columna de destilación simple, esto con el objetivo de poder separar de la mejor manera el aceite del biodiesel. Dicha columna de destilación trabajo con un total de 20 platos, la etapa de alimentación de la mezcla fue la etapa número 4.

Esta configuración se eligió con el objetivo de comparar consumo de energía y los costos asociados al proceso. Se utilizó el modelo termodinámico Peng-Robinson por su eficacia en sistemas con compuestos no polares y semi-polares. A partir de la simulación, se obtuvieron los flujos de salida y los costos asociados a materias primas y energía, que fueron utilizados para calcular el costo unitario de producción por litro de biodiésel.

Resultados y Discusión

Evaluación de la capacidad de recolección de AVU

Con base en la encuesta aplicada a 55 comercios ubicados en la zona centro del municipio de Jalpa de Méndez, se identificó que la mayoría de los establecimientos genera y desecha aceite vegetal usado (AVU) en cantidades

significativas. Las respuestas a las preguntas clave (¿Donarías el aceite que desechas? Y ¿Dónde desechas el aceite que utilizas?) evidenciaron que una proporción considerable de comerciantes estaría dispuesta a donar el AVU para proyectos de aprovechamiento, mientras que otro grupo lo desecha directamente al drenaje o al suelo, lo que representa un riesgo ambiental. La estimación aproximada de recolección mensual de aceite fue de 790 litros. Estos resultados reflejan una oportunidad para implementar estrategias de valorización del AVU en el municipio (Figura 2).

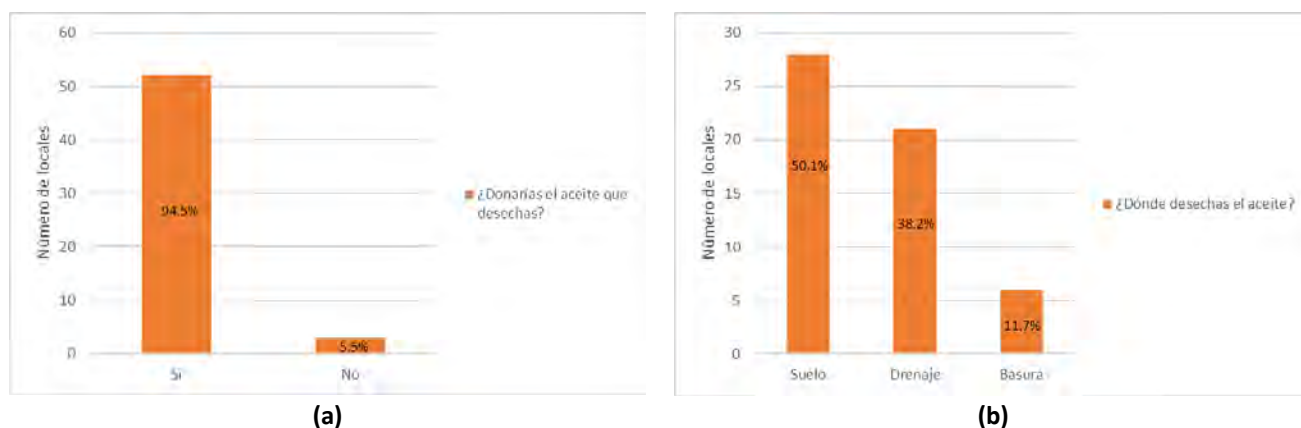


Figura 2. Respuesta a las preguntas: (a) ¿Donarías el aceite que desechas? y (b) ¿Dónde desechas el aceite?

Caracterización del biodiésel obtenido

El biodiésel producido a partir de AVU fue sometido a pruebas de densidad, viscosidad y poder calorífico, además de una comparación física mediante la prueba de combustión. En la Tabla 2 se presentan los valores experimentales obtenidos y su comparación con los rangos establecidos por las normas ASTM D6751-23. Se tomaron muestras por triplicado y lo que se presenta en la Tabla 2 es un valor promedio.

Tabla 2. Resultados de la caracterización de biodiésel obtenido

Muestra	Densidad a 15°C (g/cm ³)	Viscosidad a 40°C (mm ² /s)	Poder calorífico (kJ/kg)
Biodiésel obtenido	0.9031	7.4948	37.876
Especificación ASTM	0.86 – 0.90	1.9 – 6	37 – 41

Se observa que la densidad y el poder calorífico se encuentran dentro del rango aceptable, aunque la viscosidad resultó ligeramente superior al límite especificado, lo que indica la necesidad de optimizar el proceso de purificación. Estos resultados coinciden con estudios previos, donde el biodiésel derivado de AVU presenta propiedades muy próximas a las establecidas en normativas internacionales (Qadeer *et al.*, 2021).

En la prueba de combustión comparativa (Figura 3), el biodiésel mostró una flama similar a la del biodiésel comercial, con una menor producción de humo que el aceite vegetal, lo que confirma su potencial como combustible alternativo.



Figura 3. Prueba de flama comparativa, diésel, biodiésel y aceite usado

Evaluación y análisis tecnoeconómico

Con la finalidad de proyectar el proceso a escala industrial, se realizó una simulación en Aspen Plus v10 empleando un flujo de alimentación de 24.232 kg/día de AVU. El flujo de alimentación se estableció con base en los resultados de la encuesta. El proceso experimental tuvo una conversión del 98%, y esto se estableció para la simulación. Los resultados obtenidos en las diferentes etapas que considera el proceso se describen a continuación.

En la etapa de pretratamiento, Figura 4(a), se pudo observar que el aceite se puede limpiar de manera eficiente y controlada con los equipos propuestos en la simulación, alcanzando hasta un 99% de limpieza, lo que resultaría muy satisfactorio por el hecho de que el biodiésel saldría más libre y limpio de contaminantes. Respecto a esta etapa, el consumo energético fue de 1567.04 Btu/h. En la etapa de reacción, Figura 4(b), se pudo observar que la transformación del aceite alcanzó la conversión del 98% y el consumo de energía fue de 91.149 Btu/h.

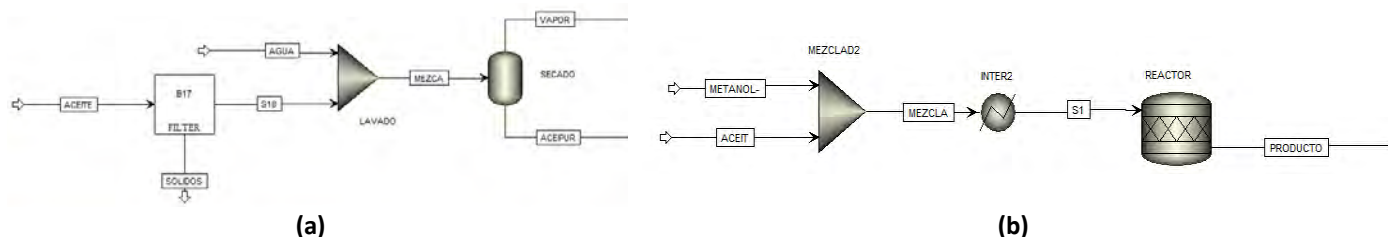


Figura 4. (a) Etapa de pretratamiento del aceite vegetal usado y (b) Etapa de reacción

En la etapa de purificación del biodiésel, Figura 5, se buscó separar el biodiésel de los restos de reactivos que no reaccionaron y del subproducto. Para ello se utilizaron tres métodos convencionales de operaciones unitarias, separación flash, extracción líquido-líquido y destilación común. La primera operación unitaria se encargó de separar el metanol y el cosolvente del resto de la mezcla. Dicha corriente fue recirculada de nuevo al proceso, para así poder seguir reutilizándolo, y aprovecharlo al máximo. La separación máxima que se obtuvo aquí fue del 99% del metanol que no reacciona. En la parte de la extracción líquido-líquido se buscó la separación de la glicerina que se creó como subproducto, en esta operación unitaria se utilizó agua como solvente y gracias a ello se pudo lograr una separación total de la glicerina. Por último, se buscó separar el biodiésel del aceite que no reacciona, para así poder obtenerlo, lo más puro y limpio posible, para ello se utilizó una columna de destilación simple en la cual se alcanzó una separación del 99.9% de biodiésel de la mezcla, lo cual resulta muy satisfactorio ya que el producto saldría con una excelente calidad. En esta etapa a diferencia de las anteriores, es la que utiliza el mayor consumo energético, el cual es de 618,807.812 Btu/h.

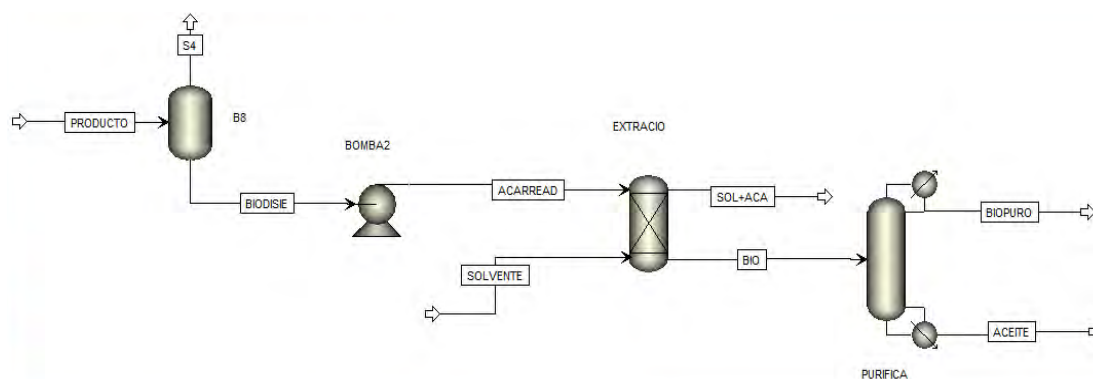


Figura 5. Etapa de purificación del biodiésel

Con estos resultados se estimó que la producción anual de biodiésel podría alcanzar los 6,832.435 litros, a la planta le costaría 0.692 USD producir 1 litro de biodiésel, el capital total que se necesitaría para poder construir la planta sería de 4,349,390 USD, lo que incluiría costos de instalación y equipos, el costo total de operación sería de 1,450,670 USD. Este valor se encuentra dentro del rango reportado en estudios previos, que varía entre 0.36 y 1.27 USD/L, dependiendo de la tecnología empleada y la escala de producción (Karmee, 2015). Los costos estimados indican que, aunque la producción de biodiésel a partir de AVU presenta ventajas ambientales y de economía circular, su competitividad económica frente al diésel fósil depende en gran medida de la optimización del proceso y de incentivos regulatorios. Otros estudios confirman que la ruta supercrítica, si bien evita el uso de catalizadores, implica mayores requerimientos energéticos, lo que incrementa el costo operativo (Tipsri & Lersbamrungsuk, 2019). A pesar de ello, el uso de AVU sigue siendo una alternativa prometedora para reducir impactos ambientales y valorizar residuos urbanos.

Conclusiones

El estudio demostró la viabilidad técnica y económica de producir biodiésel a partir de aceite vegetal usado (AVU) recolectado en Jalpa de Méndez, Tabasco, confirmando que existe una disponibilidad significativa de materia prima y disposición de los comerciantes para su aprovechamiento. El biodiésel obtenido presentó densidad y poder calorífico dentro de los rangos establecidos por la norma ASTM D6751-23, aunque la viscosidad fue ligeramente superior, lo que indica la necesidad de optimizar la purificación. La simulación en Aspen Plus validó la factibilidad del proceso, alcanzando una conversión del 98 %, pero evidenció un alto consumo energético en la etapa de purificación. El análisis económico arrojó un costo de 0.692 USD por litro, competitivo frente a valores reportados, aunque su viabilidad frente al diésel fósil dependerá de la optimización del proceso y de incentivos regulatorios. En conjunto, la valorización del AVU para la producción de biodiésel es una alternativa ambientalmente favorable y viable dentro de esquemas de economía circular, aunque se recomienda continuar con estudios orientados a mejorar la eficiencia energética e integrar fuentes renovables para fortalecer la sostenibilidad del proceso en el escalamiento.

Agradecimientos y financiamiento: Agradecemos a los comerciantes que respondieron las preguntas y su disposición. Agradecemos también a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por todo el apoyo otorgado.

Bibliografía

- Alarcón Tarira, M., & Romero Mosquera, R. (2021). *Estudio y diseño de un sistema de recolección de aceite vegetal usado para el sector comercial y residencial del Norte de la ciudad de Guayaquil*. Proyecto técnico de titulación, Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.
- Alori, E. T., Gabasawa, A. I., Elenwo, C. E., & Agbeyegbe, O. O. (2022). Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment. *Frontiers in Soil Science*, 2, 937186. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.937186>
- ASTM International. (2023). *ASTM D6751-23: Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels*. ASTM International. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/astm/09830f91-323-49b6-be4d-c791da-d67-23>
- Campos-Ramírez, L., Pérez-Sánchez, A., Benítez-Legrá, A., & Benítez, I. (2020). Estudio técnico-económico de dos tecnologías de producción de biodiesel a partir de aceite de soya empleando el simulador SuperPro Designer. *Tecnológicas*, 23(48), 119–141. <https://doi.org/10.22430/22565337.1568>
- Karmee, S. K. (2015). Techno-economic evaluation of biodiesel production from waste cooking oil—a case study of Hong Kong. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(3), 4362–4371. <https://doi.org/10.3390/ijms16034362>
- Maçaira, J., Santana, A., Costa, A., Ramirez, E., & Larrayoz, M. A. (2014). Process intensification using CO₂ as cosolvent under supercritical conditions applied to the design of biodiesel production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(10), 3985–3995. <https://doi.org/10.1021/ie402657e>
- Qadeer, M. U., Ayoub, M., Komiyama, M., Daulatzai, M. U. K., Mukhtar, A., Saqib, S., Ullah, S., Qyyum, M. A., Asif, S., & Bokhari, A. (2021). Review of biodiesel synthesis technologies, current trends, yield influencing factors and economical analysis of supercritical process. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125575. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127388>
- Riojas-González, H. H., Guerra-Bautista, R., Ruiz, H. A., & Rodríguez-Jasso, R. M. (2022). Producción de biodiésel y análisis de costos usando aceite de cocina. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 1(1), 1–20. https://riiit.com.mx/apps/site/files_v2450/biodiesel_tam_9_riiit_mar-abr_2023.pdf
- Tipsri, T., & Lersbamrungsuk, V. (2019). Techno-economic analysis of biodiesel production from waste cooking oil using supercritical and subcritical processes. *Science, Engineering and Health Studies*, 13(3), 153–162. <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/SUST/10993617.pdf>
- Torroba, A. (2020). *Atlas de los biocombustibles líquidos 2019–2020*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <https://www.biodiesel.com.ar/atlas-biocombustibles-liquidos.pdf>
- Turco, A., Primiceri, E., Frigione, M., Maruccio, G., & Malitesta, C. (2018). An innovative, fast and facile soft-template approach for the fabrication of porous PDMS for oil-water separation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.03719>

Optimización de procesos operativos mediante PERT para la mejora en eficiencia y reducción de costos en servicios petroleros

Lizbeth Yanareli Rodríguez-Palma, Moisés Abraham Petriz-Prieto, José Castro-Baeza, Esveidi Montserrat Valdovinos-García *

División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez (DAMJM), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), Carret. Estatal Libre Villahermosa-Comalcalco km. 27+000 s/n Ranchería Ribera Alta, Jalpa de Méndez, Tabasco, C.P. 86205, México

*Autor de correspondencia: esveidi.valdovinos@ujat.mx;

Desarrollo Sustentable (Ahorro de recursos en procesos industriales)

Recibido: 23 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 27 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.628>

Resumen: La eficiencia operativa en la industria petrolera depende de la adecuada gestión de procesos, ya que los retrasos generan costos adicionales y reducen la competitividad. Este estudio aplicó el método PERT (Program Evaluation and Review Technique) para identificar la ruta crítica en el flujo actual de renta de herramientas de perforación en una empresa del sector petrolero y diseñar una propuesta de mejora que optimice los tiempos de atención. El análisis inicial reveló ocho trayectorias posibles, siendo la Ruta 6 la crítica, con una duración aproximada de 9.45 horas. La propuesta consistió en reorganizar actividades internas y realizar mantenimiento preventivo inmediato, reduciendo el tiempo total del proceso en un 10 % (8.39 horas) y consolidando la atención al cliente en 0.42 horas mediante la implementación de un inventario en tiempo real. Estos resultados evidencian que la aplicación de PERT no solo contribuye a minimizar cuellos de botella y sobrecostos por mantenimientos urgentes, sino que también impulsa la sostenibilidad del servicio al optimizar el uso de recursos humanos, energéticos y logísticos.

Palabras clave: PERT, ruta crítica, optimización de procesos, industria petrolera, sostenibilidad operativa

Operational process optimization using PERT to improve efficiency and reduce costs in oilfield services

Abstract: Operational efficiency in the oil industry depends on proper process management, as delays generate additional costs and reduce competitiveness. This study applied the Program Evaluation and Review Technique (PERT) to identify the critical path in the current workflow of drilling tool rental in an oilfield service company and to design an improvement proposal aimed at optimizing response times. The initial analysis revealed eight possible paths, with Path 6 identified as critical, having an approximate duration of 9.45 hours. The proposed improvement consisted of reorganizing internal activities and implementing immediate preventive maintenance, reducing the total process time by 10% (8.39 hours) and consolidating customer service in 0.42 hours through the implementation of a real-time inventory. These findings demonstrate that the application of PERT not only helps minimize bottlenecks and additional costs associated with urgent maintenance but also enhances service sustainability by optimizing the use of human, energy, and logistical resources.

Keywords: PERT, critical path, process optimization, oil industry, operational sustainability

Introducción

En la industria petrolera, caracterizada por operaciones complejas y altos costos asociados a la ineficiencia, la optimización de procesos se ha convertido en un factor estratégico para mantener la competitividad y garantizar la sostenibilidad operativa (Montenegro *et al.*, 2024; Pincay *et al.*, 2025). Los retrasos en la atención de servicios no solo incrementan los tiempos de entrega y el consumo de recursos, sino que también generan sobrecostos que impactan directamente en la rentabilidad del negocio (Gallo Pilapanta, 2015). La ausencia de una planificación presupuestaria adecuada no solo pone en riesgo la viabilidad operativa de las actividades, sino que también afecta de manera adversa la calidad de los servicios prestados por la organización, incrementando prácticas de gestión ineficiente y mal uso de los recursos financieros (López Paredes *et al.*, 2025). Ante este escenario, la adopción de metodologías que permitan identificar cuellos de botella y priorizar actividades críticas resulta indispensable para mejorar la eficiencia, reducir costos y fortalecer la capacidad de respuesta (Enrique Arguello *et al.*, 2018).

Entre las herramientas de planificación y control de proyectos, el método PERT (Program Evaluation and Review Technique) se ha consolidado como un enfoque eficaz para analizar secuencias de actividades interdependientes, estimar tiempos de ejecución y determinar la ruta crítica de un proceso (Capri, 1975; Poggioli, s.f.). Su aplicación en

entornos industriales ofrece la posibilidad de gestionar recursos de forma más eficiente, prever retrasos y diseñar estrategias orientadas a la mejora continua (Jiménez Trejo, 2005). El método PERT considera tres estimaciones para cada actividad: tiempo optimista (T_0), más probable (T_m) y pesimista (T_p), a partir de las cuales se calcula un tiempo esperado (T_e) como se presenta en la Ecuación 1 (Capri, 1975):

$$T_e = \frac{T_0 + 4T_m + T_p}{6} \quad (1)$$

La estimación ponderada permite obtener una aproximación realista de la duración esperada, considerando la variabilidad inherente a los procesos industriales (Enrique-Arguello *et al.*, 2018). Además, el análisis PERT facilita el cálculo de la varianza y la desviación estándar del proyecto, estimando la probabilidad de finalizar en un tiempo específico, lo que la convierte en una herramienta clave para la toma de decisiones en escenarios de incertidumbre (Jiménez Trejo, 2005).

Diversos estudios han evidenciado la eficacia del método PERT en la optimización de procesos industriales y en la mejora de la eficiencia operativa. Montenegro *et al.*, (2024) aplicaron PERT/CPM para identificar actividades críticas en la distribución de materiales, logrando reducciones significativas en los tiempos de ciclo. De manera similar, Gallo Pilapanta (2015) reportó mejoras sustanciales en la gestión de proyectos en empresas de servicios petroleros mediante el análisis de rutas críticas. En el mismo sentido, Alcívar *et al.* (2023) destacaron la utilidad del método PERT en la industria petrolera para minimizar retrasos y optimizar recursos, mientras que Vega y Herrera (2022) demostraron su aplicabilidad en la optimización de cadenas de suministro, resaltando su relevancia en entornos de alta demanda y variabilidad. Estas evidencias respaldan la pertinencia de implementar esta metodología en el contexto actual de la renta de herramientas de perforación. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo identificar la ruta crítica del proceso actual de renta de herramientas de perforación en una empresa del sector petrolero, mediante la aplicación del método PERT, y proponer un rediseño operativo que reduzca tiempos de ejecución y minimice costos adicionales. Con ello, se busca optimizar el desempeño del servicio, garantizar la disponibilidad de herramientas en menor plazo y contribuir a la sostenibilidad del proceso mediante el uso eficiente de recursos (Llanos Encalada *et al.*, 2023). Por otro lado, este estudio se limita a considerar los tiempos optimistas a pesimistas, los cuales se obtienen a partir de los registros históricos proporcionados por la empresa. Toda situación extraordinaria, por condiciones externas o internas, queda fuera de consideración dado que se pretende obtener una solución que sea aplicable a los rangos de tiempo más comunes a las actividades analizadas.

Materiales y Métodos

El estudio se desarrolló en una empresa del sector petrolero dedicada a la renta de herramientas de perforación, cuenta con aproximadamente 150 empleados y proporciona alrededor de 5 servicios al día, donde renta un promedio de 15 herramientas. Por cada servicio realizado factura de 3000 a 5000 USD. La empresa proporciona sus servicios las 24 horas del día y los 7 días de la semana. El objetivo de este trabajo es identificar la ruta crítica del proceso operativo actual y proponer estrategias para su optimización.

Recopilación y análisis de datos

Se inició con la identificación de las operaciones y actividades que conforman el flujo de trabajo, registrando su duración y relaciones de dependencia. Para cada actividad se definieron tres estimaciones de tiempo: optimista (T_0), más probable (T_m) y pesimista (T_p), con base en observaciones directas y en datos históricos proporcionados por la empresa.

Aplicación del método PERT

Con la información recopilada, se elaboró un diagrama de red que representa la secuencia lógica de las actividades. Posteriormente, se calcularon los tiempos esperados para cada operación utilizando la expresión mostrada en la Ecuación 1, lo que permitió obtener una estimación ponderada más realista para cada actividad (Enrique-Arguello *et al.*, 2018; Capri, 1975). Este análisis también facilitó la determinación de los tiempos de inicio y finalización más tempranos y tardíos, así como la duración total del proceso, identificando la ruta crítica que condiciona el tiempo de atención al cliente.

Evaluación y propuesta de mejora

Con base en la ruta crítica identificada, se priorizaron las actividades con mayor impacto en la duración del proceso, diseñando un esquema optimizado orientado a reducir los tiempos de ciclo, eliminar sobrecostos asociados a mantenimientos urgentes y mejorar la disponibilidad de herramientas. Finalmente, se implementó una evaluación comparativa entre el flujo operativo original y la propuesta mejorada, midiendo la reducción porcentual en la duración total del servicio.

Resultados y Discusión

El análisis del proceso operativo actual (Tabla 1) permitió identificar un total de ocho trayectorias posibles (Tabla 2) en la red de actividades, obtenidas a partir del diagrama PERT mostrado en la Figura 1, el cual representa la secuencia actual de operaciones. Estas trayectorias se determinaron considerando todas las combinaciones de actividades que conectan el nodo inicial con el nodo final, conforme a las dependencias establecidas en la red.

Tabla 1. Datos por el método PERT (Tiempo optimista, probable, pesimista y esperado, en horas)

Clave	Actividad	Predecesora	Tiempo optimista (T_o)	Tiempo más probable (T_m)	Tiempo pesimista (T_p)	Tiempo esperado (T_e)
A	Inicio: Solicitud del cliente	N/A	0.16	0.25	0.5	0.28
B	Búsqueda de herramientas	A	0.25	0.33	0.83	0.40
C	Lavado de herramientas	B	0.25	0.5	1	0.54
D	No se cuenta con la herramienta	B	0.33	0.5	1	0.56
E	Revisión de inspección	B	0.08	0.25	0.5	0.26
F	Si cuenta con inspección vigente	E	0.08	0.25	0.5	0.26
G	(No) Envío a inspección con servicio de urgencia	C,E	1	2	5	2.33
H	(No) Envío a reparación con servicio de urgencia	G	1	2	5	2.33
I	(No) Envío a inspección con servicio de urgencia	H	0.5	1	3	1.25
J	(Si) Acondicionamiento de la herramienta	F,G,I	0.16	0.33	0.66	0.36
K	(Si) Dimensionamiento y elaboración de ficha técnica	J	0.16	0.33	0.5	0.33
L	Notificación y entrega al cliente: Reunión con el cliente	J,K	0.5	1	5	1.58
M	Entrega de herramienta al cliente	L	0.16	0.33	0.5	0.33
N	Fin del proceso	D,M				

Tabla 2. Trayectorias de ejecución dentro de la red

Ruta	Trayectoria	Tiempo de ejecución (h)
1	A,B,C,G,H,I,J,L,M,N	9.4
2	A,B,D,N	1.24
3	A,B,C,G,J,L,M,N	5.82
4	A,B,C,G,J,K,L,M,N	6.15
5	A,B,E,G,H,I,J,L,M,N	9.12
6	A,B,E,G,H,I,J,K,L,M,N	9.45 (RC)
7	A,B,E,F,J,L,M,N	3.47
8	A,B,E,F,J,K,L,M,N	3.8

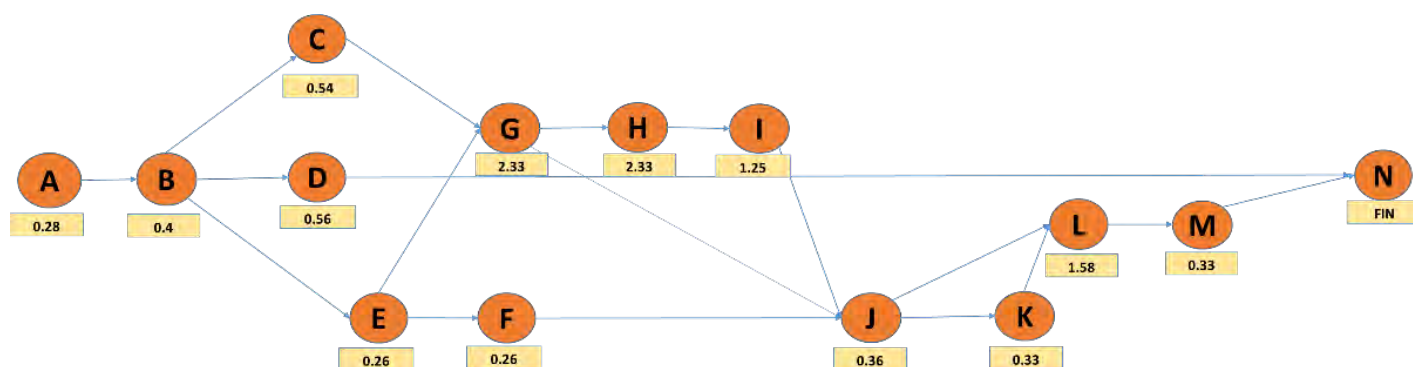


Figura 1. Diagrama PERT del proceso operativo

En la Tabla 1 además de mostrar los tiempos optimistas, más probables y pesimistas utilizados para este análisis, también se presentan los valores de tiempo esperado para cada actividad. Con esta información, se elaboró el diagrama PERT con tiempos esperados (Figura 1) y se calcularon las duraciones totales de cada una de las trayectorias. Con los resultados se determinó que la Ruta 6 es la ruta crítica (RC) (A, B, E, G, H, I, J, K, L, M, N), con una duración acumulada aproximada de 9.45 horas para la atención completa del servicio. Esta ruta contempla lo siguiente: A) el cliente se comunica con el área de operaciones de la empresa y consulta la disponibilidad de herramientas de acuerdo con su necesidad. B) La empresa programa al personal responsable para verificar si la herramienta se encuentra en el taller, y si la herramienta si se encuentra físicamente en el taller, se procede a verificar si cumple con inspección vigente y pasa a la operación E), la revisión de inspección vigente. Si la herramienta no cuenta con la inspección vigente, se elabora una orden de servicio para su inspección con servicio de urgencia, y se asigna personal para el transporte de la herramienta a su servicio, G) Envío a inspección con servicio de urgencia. Si la herramienta no se encuentra en buenas condiciones, esta se envía a reparación con servicio de urgencia, H). Ya que se reparó la herramienta, ésta se envía nuevamente a inspección para verificar que la reparación haya quedado bien y no presente ningún otro daño, I). Una vez que la herramienta cuenta con reporte de inspección ACEPTADO, se asigna personal para su acondicionamiento de limpieza, pintura, protección de conexiones, J) y su elaboración de ficha técnica, K). Cuando la herramienta ya cuenta con reporte de inspección, dimensionamiento, ficha técnica y se encuentra pintada, se le notifica al cliente que su solicitud esta lista, para proceder a programar la reunión de revisión de las herramientas, L), y finalmente llegar a la entrega, M), y así llegamos al Fin del proceso, N).

Con el análisis de la Ruta crítica observamos que el gran problema que presenta la empresa es debido a que no se tiene un inventario el cual pueda ser consultado en tiempo real y con esta información poder dar una pronta respuesta al cliente. Para que este inventario funcione las herramientas inventariadas ya deben estar limpias y con su reporte de inspección de ACEPTADO, así el tiempo de respuesta al cliente sería mucho menor. Este resultado confirma que la secuencia actual de operaciones presenta un cuello de botella significativo, que limita la reducción de los tiempos de respuesta y afecta la disponibilidad de herramientas para el cliente. Por lo tanto, su optimización resulta prioritaria para mejorar la eficiencia operativa, incrementar la disponibilidad de recursos y reducir los plazos de entrega sin comprometer la calidad del servicio.

Propuesta de mejora.

A partir de los resultados anteriores, se desarrolló una propuesta de mejora basada en la reorganización de actividades críticas y la atención inmediata al mantenimiento de las herramientas al momento de su retorno. Las actividades internas de la empresa se podrían reorganizar a como se indican en la Tabla 3.

Al aplicar nuevamente el análisis PERT a este esquema optimizado (Figura 2), se identificaron tres rutas principales (Tabla 4), de las cuales la de mayor duración alcanzó 8.39 horas (ruta 2), lo que representa una reducción aproximada del 10% en el tiempo de respuesta.

Tabla 3. Datos por el método PERT para la propuesta de mejora (Tiempo optimista, probable, pesimista y esperado, en horas)

Clave	Actividad	Predecesora	Tiempo esperado (T_e)
A	Inicio: Retorno de herramienta a base	N/A	0
B	Descarga de la herramienta	A	0.25
C	Lavado de la herramienta	B	0.54
D	Envío de la herramienta a inspección	C	2.33
E	Acondicionamiento de la herramienta	D, G	1.36
F	Envío de la herramienta a reparación	D	2.33
G	Envío de la herramienta a inspección	F	1.25
H	Dimensionamiento y elaboración de ficha técnica	E	0.33
I	Área de acomodo	B	0.25
J	Mantenimiento menor	I	0.5
K	Acomodo de herramientas listas en su lugar asignado	H, j	

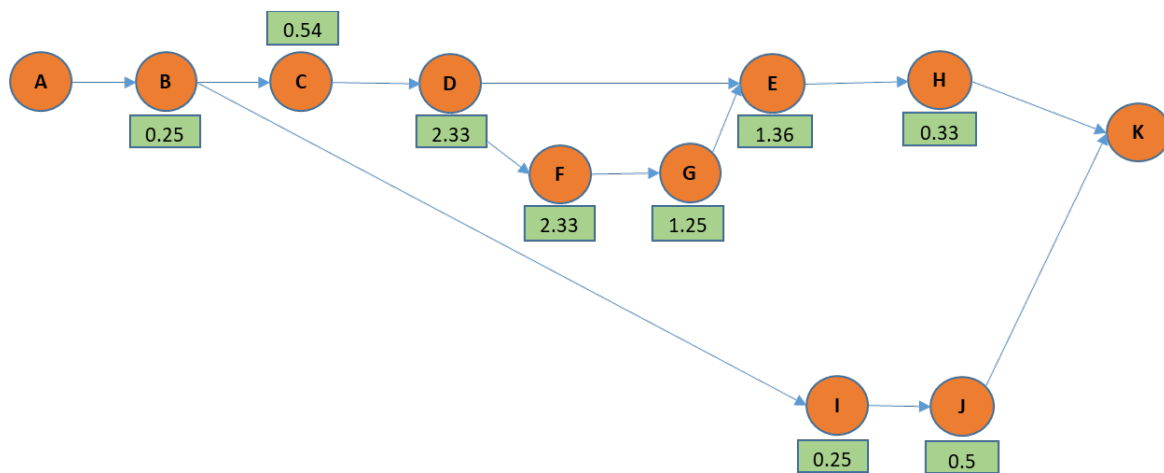


Figura 2. Diagrama PERT de la propuesta de mejora en el proceso operativo

Si bien la ruta 2 (Tabla 4) no incluye el proceso de confirmación y entrega al cliente, es decir, cuando el cliente se comunica para consultar la disponibilidad (inicio, tiempo = 0 horas), ni la búsqueda de la herramienta (tiempo = 0.17 horas), ni la notificación y entrega al cliente (tiempo = 0.25 horas), el incluir esta ruta crítica fuera del proceso de atención al cliente (tiempo = 0.42 horas), y generar una base de datos actualizada de la herramienta lista para entrega al cliente, provocaría que en solo tres pasos y en cuestión de minutos se le confirme al cliente la disponibilidad de la herramienta, ahorrando también costos asociados a la mano de obra. Esto contribuye también a ofrecer un mejor servicio y poder cubrir las necesidades en menor tiempo de más clientes, generando también una mayor ganancia económica para la empresa. Estos resultados muestran el impacto en la capacidad de respuesta y que la gestión de recursos es relevante para la empresa, ya que reduce tiempos improductivos y sobrecostos por mantenimiento urgente.

Tabla 4. Trayectorias de ejecución para el proceso propuesto

Ruta	Trayectoria	Tempo de ejecución (h)
1	A,B,C,D,E,H,K	4.81
2	A,B,C,D,F,G,E,H,K	8.39 (RC)
3	A,B,I,J,K	1

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Montenegro *et al.* (2024) y Alcívar *et al.* (2023), quienes demostraron que la aplicación de PERT en entornos industriales contribuye significativamente a reducir tiempos de ciclo y mejorar

la utilización de recursos. Asimismo, Vega y Herrera (2022) destacan que la gestión proactiva de actividades críticas genera ahorros operativos y una mayor sostenibilidad en procesos logísticos y de servicios. En este caso, la reducción de mantenimientos en modalidad urgente también implica un ahorro estimado de 700 USD por evento, lo que refuerza el impacto económico positivo del rediseño propuesto. En términos de sostenibilidad, la disminución en los tiempos de ciclo contribuye al uso eficiente de recursos humanos, energéticos y logísticos, alineándose con las estrategias de mejora continua y competitividad en el sector petrolero. De esta forma, el análisis PERT no solo se confirma como una herramienta técnica para la planificación, sino como un elemento estratégico para impulsar la eficiencia y la rentabilidad con enfoque sustentable. Como siguiente etapa del proyecto y trabajo a futuro, solo si la empresa nos lo permite, se planea realizar un análisis de la reducción exacta de gastos por mantenimientos urgentes y la implementación del inventario, así como también determinar cuál es potencial económico de la empresa si aumenta sus tiempos de respuesta y ofrece más servicios de renta de herramientas.

Conclusiones

El análisis del proceso operativo actual permitió identificar que la Ruta 6 constituye la ruta crítica, con una duración aproximada de 9.45 horas, lo que evidencia la existencia de cuellos de botella que limitan la eficiencia y aumentan los costos operativos. Este hallazgo confirmó la necesidad de optimizar el flujo de trabajo para garantizar una atención más ágil y confiable al cliente. La implementación de la propuesta de mejora, basada en la reorganización de actividades críticas y la atención inmediata al mantenimiento de herramientas, permitió reducir el tiempo total del proceso en aproximadamente un 10 %, además de consolidar la atención al cliente en un tiempo estimado de 0.42 horas. Estas mejoras contribuyen a disminuir costos asociados a mantenimientos urgentes, optimizar recursos humanos y energéticos, y fortalecer la competitividad del servicio.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la reducción en los tiempos de ciclo y en el uso de recursos logísticos refuerza la eficiencia operativa y el aprovechamiento responsable de los medios disponibles, alineándose con estrategias de mejora continua en la industria petrolera. Como trabajo futuro, se plantea evaluar el impacto económico total derivado de la disminución de sobrecostos y proyectar el incremento en la capacidad de atención de la empresa mediante la implementación de un inventario en tiempo real.

Agradecimientos y financiamiento: Este proyecto no recibió financiamiento. Agradecemos a la empresa de servicios petroleros que nos permitió sus datos y procedimientos para el desarrollo de este trabajo. También agradecemos a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por el apoyo otorgado.

Bibliografía

- Alcívar, J. A. C., Chávez, E. J. Q., & Pincay, G. M. I. (2023). Aplicación del método PERT para optimización de procesos en la industria petrolera. *Revista Ingenio Global*, 3(2), 130–145.
- Capri, C. B. (1975). *Apuntes de ruta crítica para Construcción III*. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/handle/132.248.52.100/13328>
- Enrique-Arguello, E., Villagrán-Cáceres, W. J., Buenaño-Moyano, L. F., Altamirano-Balseca, M., & Cruz-Siguenza, E. L. (2018). Modelación matemática para la estimación del tiempo de la ruta crítica de un proyecto utilizando el método PERT. *Polo del Conocimiento*, 3(11), 176. <https://doi.org/10.23857/pc.v3i11.786>
- Gallo Pilapanta, D. S. (2015). *Levantamiento y optimización de procesos para la implementación de un sistema ERP enfocado a la gestión de proyectos y medición de la productividad de una empresa de servicios petroleros* (Tesis de pregrado). Universidad de las Américas, Quito.
- Jiménez Trejo, J. (2005). *Novedoso procedimiento de ruta crítica enfocado a la construcción*.
- Llanos Encalada, M., Bell Heredia, R. E., & Correa Vaca, A. M. (2023). Visibilidad regional de prácticas de economía circular en publicaciones científicas de alto impacto. *Universidad y Sociedad*, 15(6), 185–195.
- López Paredes, J. P., Montesdeoca Loo, R., Valdivieso Álvarez, K. A., & Sornoza Parrales, D. (2025). Planificación presupuestaria y mantenimiento de obras: desafíos y estrategias. *INGENIAR: Ingeniería, Tecnología E Investigación*, 8(15), 1–11. <https://doi.org/10.46296/ig.v8i15.0238>
- Montenegro, A. M. M., González, J. A. D., & González, J. T. (2024). Optimización de operaciones en distribuidora mediante PERT/CPM para determinar actividades críticas. *Tecnociencia*, 26(1), 151–164. <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v26n1.a4656>
- Pincay, G. M. I., Chávez, E. J. Q., Alcívar, J. A. C., & Calle, V. A. L. (2025). Gestión de riesgos en planificación de obras civiles: mitigación de retrasos y sobrecostos en construcción, un análisis textual discursivo. *Revista Ingenio Global*, 4(1), 160–174. <https://doi.org/10.62943/rig.v4n1.2025.203>
- Poggioli, P. (s. f.). *Aplicación práctica del método PERT*. Reverté.
- Vega, J., & Herrera, P. (2022). Optimización de la cadena de suministro mediante PERT y CPM. *Revista de Ingeniería Industrial*, 10(1), 45–56.

Termosolaridad Pasiva: un potencial marginado

Luis Gerardo Frausto Torres *

Quantab LAB, Innovación y Desarrollo. Av. Paseo de los Insurgentes 304-15, J. del Moral CP 37160, León, Guanajuato, México

* Autor de correspondencia: lfrausto@innocent.com, quantab_LAB@innocent.com

Energías Renovables (Energía Solar)

Recibido: 25 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 27 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.637>

Resumen: Hoy los combustibles fósiles representan más del 80% del suministro total de energía en la economía global. Para satisfacer la creciente demanda de energía de manera sostenible será necesario incrementar la capacidad de la generación por medios renovables con cara a la mitad del presente siglo. Los dos procedimientos convencionales para transformar la luz solar en energía utilizable son la vía fotovoltaica (PV) y la termosolar. La Energía Termosolar Pasiva (ETP), transfiere la energía solar a flujos de calor con aplicaciones útiles como la calefacción de espacios, edificios, superficies o agua. En este trabajo sugiero que el potencial de las tecnologías ETP ha sido poco valorado, y que los avances de su penetración en los mercados han sido crónicamente marginados en el escenario económico. Argumento que los esfuerzos de investigación en el campo están presentes, pero podrían estar siendo desfavorecidos por una falta de interés macroeconómico y poca atención de los organismos rectores en el campo de la política energético social a nivel global.

Palabras clave: termosolaridad, energía renovable, energía solar

Passive Solar Thermal Heat: a marginalized potential

Abstract: Today, fossil fuels represent more than 80% of the total energy supply in the global economy. To sustainably meet the growing energy demand, renewable generation capacity will need to be increased by the middle of this century. The two conventional methods for transforming sunlight into usable energy are photovoltaics (PV) and solar thermal energy. Passive solar thermal energy (PSE) transfers solar energy into heat flows with useful applications such as space, building, surface, or water heating. In this paper, I suggest that the potential of PSE technologies has been underappreciated, and that advances in their market penetration have been chronically marginalized in the economic landscape. I argue that research efforts in this field are present but may be underserved by a lack of macroeconomic interest and insufficient attention from global energy and social policymaking bodies.

Keywords: solar therma, renewable energy, solar energy

Introducción

A pesar de avances tecnológicos significativos, grandes presupuestos y su promoción generalizada, la transición energética hacia una mezcla de fuentes primarias no fósiles no ha comenzado. Hoy, 82% de la generación energética que abastece la economía global depende de los recursos fósiles (carbón, gas y petróleo), mientras que la integración incremental de las tecnologías renovables en la matriz solo ha sido un elemento complementario para satisfacer el incremento progresivo de la demanda. En este contexto, las tecnologías solares juegan un papel crucial en esta transición debido a su abundancia y su potencial para diversificar la paleta energética. En especial, el conjunto de soluciones termosolares pasivas ofrece un nicho de oportunidad prometedor para cumplir con los objetivos energéticos hacia una economía predominantemente renovable (DNV, 2024; Energy Institute, 2025; IRENA, 2025; UN DESA, 2025).

La Energía Termosolar Pasiva (ETP) se refiere al uso de la radiación solar incidente para calentar elementos físicos de transferencia, almacenar calor y transferirle a receptores para satisfacer una demanda final de energía térmica. En términos simples, captura la radiación solar directa y la transforma en calor, que puede ser aprovechado en una amplia variedad de aplicaciones. Las tecnologías ETP pueden ser sencillas o ingeniosas, pero por lo general son soluciones escalables y económicas que se adaptan a diferentes contextos, desde instalaciones residenciales hasta grandes plantas de generación térmica industrial (Cillari *et al.*, 2020; Senyonyi *et al.*, 2025). De acuerdo con su temperatura de operación las tecnologías ETP han sido clasificados en sistemas: a) de baja temperatura (30-150 °C), como los colectores de placa plana, los colectores de tubos de vacío, los estanques solares y las chimeneas solares,

con eficiencias en el orden de 15-40 %; b) de temperatura media (150-400 °C), como son los reflectores lineales de Fresnel y los colectores cilindroparabólicos, cuya eficiencia aumenta a 50-60 %, y c) de alta temperatura (>400 °C), como el receptor central y el colector de disco parabólico, con eficiencias del 60-80 % (Vanegas *et al.*, 2022).

La fuente de energía última para la Tierra es el sol, haciendo de su radiación un recurso permanente porque le suministra continuamente. Los 108,000 TW de energía solar que recibe la superficie terrestre constituyen el mayor recurso energético fácilmente accesible disponible en el planeta, y representan más de 5,000 veces el consumo total anual de energía primaria del mundo (450 EJ en 2024). Si bien no toda esta radiación está disponible para su explotación económica (fracciones son asimiladas por los diferentes estratos físicos y biológicos del planeta), tan solo un aprovechamiento del 1% de esta energía mediante las diferentes tecnologías solares aún superaría la demanda energética global más de 50 veces (Weingart, 1979; Kren 2017; World Energy Council, 2013; Energy Institute, 2025; IEA 2025).

La función de las soluciones ETP es la aportación de energía térmica útil (calor); y en este sentido, los requerimientos de calor conforman un factor reconocido y cuantificado en la demanda de las industrias, edificios y del sector doméstico. A nivel mundial, un 20 % de los hogares dependen del calor para la calefacción. Actualmente este calor se contabiliza como la energía térmica obtenida de centrales eléctricas y procesos industriales, que se suministra en forma de agua caliente o vapor y se vende como medio de calefacción urbana o para operaciones industriales. Aproximadamente el 87% de este calor (doméstico, urbano e industrial) es reportado como proveniente de la combustión de recursos fósiles y el resto de las biomasas, como la leña (Figura 1) (DNV, 2024).

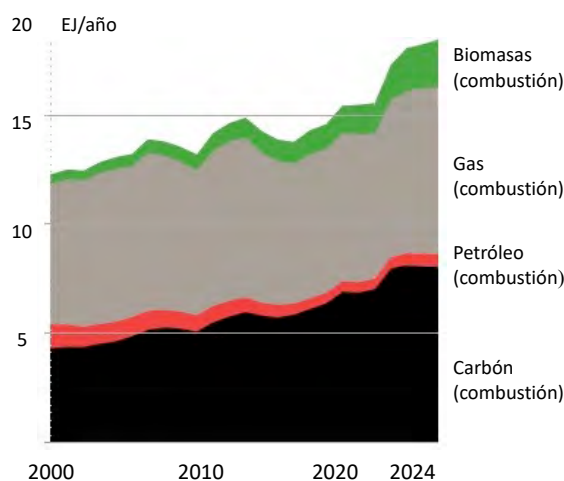


Figura 1. Suministro mundial de calor contabilizado oficialmente (DNV 2024; IEA 2024)

Las aplicaciones de la termosolaridad pasiva han estado presentes en la sociedad durante milenios, pero en su concepción tecnológica moderna han progresado durante las últimas cinco décadas, en su forma más común como dispositivos parabólicos, de placas y tuberías para calentar espacios, materiales, agua, aire y otros fluidos tanto doméstica como industrialmente (una forma popularmente comercializada son los calentadores de agua de tubos colocados en las azoteas). La Agencia Internacional de Energía informa que para alcanzar el objetivo propuesto de 400 millones de residencias utilizando este tipo de soluciones para 2030, establecido por este mismo organismo, será necesario instalar al menos 290 millones de nuevos dispositivos durante el resto de la década, con 120 millones de estos sistemas integrados con tecnologías emergentes y modelos innovadores (IEA, 2022, Kalogirou, 2022; Tillier, 2024; IEA SHC, 2025).

En este trabajo propongo que las tecnologías ETP cuentan con un gran potencial, que su funcionalidad se encuentra respaldada por la tarea innovativa y además aportan considerablemente en la generación de energías renovables. Sugiero, sin embargo, que su contribución se encuentra marginada en el escenario macroeconómico y su crecimiento futuro pudiera verse comprometido debido a una falta de enfoque o desinterés comercial de escala.

Metodología

Con el objetivo de identificar resultados del estudio y contenido de la investigación formal y con relevancia para este trabajo, se utilizaron motores de búsqueda como ScienceDirect, ResearchGate, Google Scholar y Scopus. Las palabras y frases clave utilizadas fueron: solar thermal, passive solar, direct heat, solar thermal capacity, solar thermal status/state of the art, etc. Se hizo un sondeo del estado de la técnica y la innovación de las ETP, y se realizó una consulta de las cifras más recientes reportadas para la capacidad instalada, la producción y la penetración en el mercado global de las ETP por los principales organismos y agencias oficiales encargados del análisis y la divulgación

en materia de energía a nivel internacional, como: Solar Heat Worldwide (IEA SHC, 2025), Global Energy Review (IEA, 2025), Renewables (IEA, 2024), SolarThermal Technologies (IEA, 2022), Statistical Review of World Energy (Energy Institute, 2025), Energy Statistics Pocketbook (UN DESA, 2025), World Energy Issues Monitor (WEC, 2025), Renewable Energy Statistics (IRENA, 2025), International Energy Outlook (EIA, 2025), Energy Transition Outlook (DNV, 2024) y Annual Report (EBN, 2024). También se consultaron publicaciones de organismos relevantes en la arena del escenario y tendencias a futuro, como: New Energy Outlook (BloombergNEF, 2025), Energy Perspectives (Equinor, 2025), The Energy Security Scenarios (Shell, 2025) y Global Change Outlook-MIT (Paltsev & Schlosser, 2023). Finalmente, se realizó un examen comparativo con la información reportada por los distintos organismos poniendo en contraste los resultados.

Se recurrió a los reportes y estudios de estas entidades debido a su reconocida autoridad y experiencia en el análisis energético global. Estos organismos internacionales proporcionan datos precisos y análisis exhaustivos que permiten fundamentar las decisiones y recomendaciones en materia energética. La información obtenida de estas fuentes es crucial para entender las tendencias actuales y futuras en el sector energético, así como para desarrollar estrategias informadas y sostenibles. El periodo de investigación abarca desde 2022 hasta 2025 (se excluyen estudios previos).

Resultados y Discusión

La exploración a través de los ecosistemas de investigación muestra que el esfuerzo en torno a las tecnologías ETP es dinámico y enfoca a una variedad de sectores e industrias, proponiendo avances en conocimiento teórico, soluciones y propuestas de aplicación. Un conjunto de publicaciones recientes presenta trabajos asociados con: cerámicos con propiedades superiores como materiales termosolares (Cunha *et al.*, 2022); análisis experimentales y numéricos de muros solares térmicos (Sornek *et al.*, 2023); soluciones con aplicaciones en arquitectura (Toroxel & Silva, 2024); secado solar con almacenamiento térmico (Bacha *et al.*, 2025); tecnologías para la refrigeración y aire acondicionado (Ghafoor & Munir, 2025); pavimentos reflectantes y sistemas de pavimentos con captación de calor (Guarino *et al.*, 2025); sistemas híbridos de calefacción para edificios en climas fríos (Hassan & Araji, 2025); estudios teóricos simulados para sistemas de almacenamiento de energía térmica basados en adsorbentes calentados con radiación solar y calor residual industrial (Narwal *et al.*, 2025); colectores solares transpirados para la recuperación de calor y el precalentamiento (Moghadam *et al.*, 2025); integración de colectores solares térmicos para calefacción de espacios y producción de agua caliente (Usta *et al.*, 2025) y deshidratadores de convección forzada para la industria alimenticia (Yasin *et al.*, 2025).

La consulta de los reportes y análisis de los principales cuerpos oficiales en materia de energía a nivel global pone de manifiesto que estas publicaciones tienden a centrarse en los temas de la transición hacia las energías limpias, la seguridad energética, las emisiones y la política relacionada, además de analizar el estado de la capacidad de generación, las tendencias en la demanda y las inversiones en infraestructura. En materia renovable, generalmente incluyen las opciones eólica y solar fotovoltaica (PV) como medios para la generación de electricidad, raramente mencionando la opción de la Energía Solar Concentrada (CSP, por sus siglas en inglés). Algunos reportes resaltan la importante demanda de calor en los sectores doméstico e industrial a nivel global, y mencionan la energía solar directa como una fuente para el suministro; pero no mencionan específicamente las tecnologías ETP en sus análisis principales (EBN, 2024; Tillier, 2024; EIA, 2025). En cuanto a escenarios y tendencias a futuro, los informes se inclinan a mencionar las energías renovables como un conjunto de tecnologías sin desagregar y definir la mezcla, y enfatizan mucho los temas de la captura de carbono, el almacenamiento, las bombas de calor, automóviles eléctricos, las baterías y el futuro del hidrógeno (Paltsev & Schlosser, 2023; BloombergNEF, 2025; Equinor, 2025; Shell, 2025). La Tabla 1 proporciona un resumen del contenido de estas publicaciones, indicando si incluyeron: energía termosolar pasiva (ETP*), análisis de ETPs (A), capacidad de generación (C), mercados (M) y termosolaridad en general (TS).

Se encontraron tres estudios, publicados en los últimos tres años, que juntos concentran el grueso del análisis del estado reciente de las tecnologías ETP en los mercados. De acuerdo con estos reportes, en 2022 unos doscientos cincuenta millones de viviendas utilizaban dispositivos termosolares domésticos para calentar agua alrededor del mundo. Estas evaluaciones muestran que la capacidad global de las energías termosolares en cuanto a dispositivos domésticos (como colectores de agua) aumentó de 62 GWth en 2000 a 544 GWth en 2024, proponiendo que la adopción histórica de estas soluciones ha sido tangible. No obstante, durante la última década la tasa de nuevas instalaciones ETP ha decrecido más de 50% globalmente (Figura 2). Los estudios indican que tal decremento se debe,

entre otros posibles factores, a la competencia de tecnologías emergentes como el agua caliente fotovoltaica, las tecnologías híbridas de colectores térmicos fotovoltaicos y las bombas de calor (IEA 2023; DNV, 2024; IEA SHC, 2025).

Tabla 1. Resumen del contenido de los estudios analizados con relación a la ETP

Agencia/Organismo		Publicación	Año	ETP*	A	C	M	TS
Agencia Internacional de Energía	IEA SCH	Solar Heat Worldwide	2025	Si	Si	Si	Si	Si
Agencia Internacional de Energía	IEA	Global Energy Review	2025	No	No	No	No	No
Energy Institute	EI	Statistical Review of World Energy	2025	No	No	No	No	No
Naciones Unidas	UN							
	DESA	Energy Statistics Pocketbook	2025	No	No	No	No	No
The World Energy Council	WEC	World Energy Issues Monitor	2025	No	No	No	No	No
Int. Renewable Energy Agency	IRENA	Renewable Energy Statistics	2025	No	No	No	No	No
Energy Information Administration	EIA	International Energy Outlook	2025	No	No	No	No	Si
DNV	DNV	Energy Transition Outlook	2024	Si	Si	No	No	Si
Energie Beheer Nederland	EBN	Annual Report	2024	No	No	No	No	Si
Agencia Internacional de Energía	IEA	Renewables	2023	No	No	No	No	Si
Agencia Internacional de E	IEA	Solar thermal technologies...	2023	Si	Si	No	No	Si
Bloomberg NEF	BNEF	New Energy Outlool	2025	No	No	No	No	No
Equinor	Equinor	Energy Perspectives	2025	No	No	No	No	No
Shell	Shell	The Energy Security Scenarios	2025	No	No	No	No	No
J. Program on Science and Policy	MIT	Global Change Outlook	2023	No	No	No	No	No

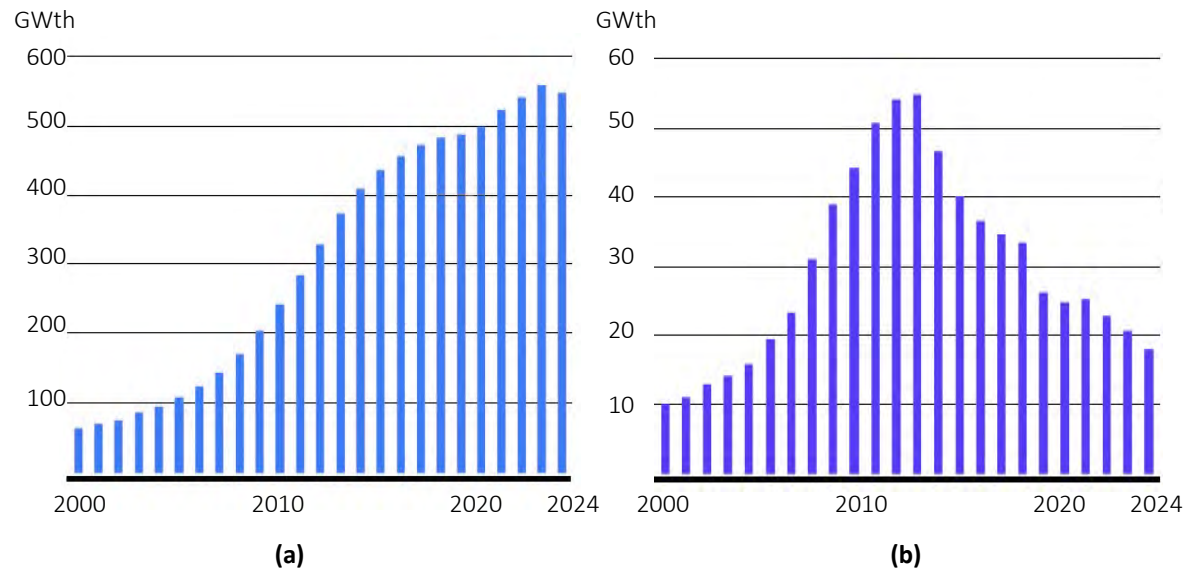


Figura 2: (a) capacidad ETP instalada global, (b) instalación agregada anualmente de ETP (GW térmicos)

Un comparativo entre la capacidad instalada de las ETP en relación con la capacidad instalada reportada para otras energías renovables consideradas en el análisis, muestra que para 2024 el potencial de operación termosolar es muy significativo en contraste con las opciones del hidrógeno, la energía solar concentrada (CSP) y la geotermia, y se encuentra rezagado tras las alternativas eólica y solar fotovoltaica (PV), como muestra la Figura 3 (IEA SHC, 2025).

A nivel mundial, una fracción de los hogares depende del calor directo como medio para la calefacción, así como en los edificios y las industrias; y en la dimensión social existen necesidades subyacentes del dominio urbano. La Agencia Internacional de Energía estima que se gestiona una expansión global del calor solar a las industrias en todo el mundo. Esto es, la extensión de las ETP a los procesos, sumándose a las instalaciones ya existentes y en operación, de las cuales la información no abunda. Afirma que actualmente hay proyectos o planificación en los cinco continentes, y

que se ha informado de 73 plantas con un total de 277 MW que se prevé se construirán para 2027, la mayoría de ellas en la Unión Europea. Esta integración a gran escala se centra en la ETP para procesos industriales y la calefacción urbana solar, con un creciente interés en los sistemas que operan hasta 250 °C. Sin embargo, los análisis consideran que las incorporaciones de estas tecnologías seguirán siendo marginales a escala global entre el presente y 2050, y que el suministro de calor por medios solares incluso disminuiría, siendo desplazado por el calor provisto por medios eléctricos. Se sugiere que los principales desafíos para alcanzar el hito de 2030 son los estándares de certificación e instalación para las tecnologías ETP (no existe armonización), las políticas discontinuas de despliegue y promoción que no favorecen el desarrollo eficiente de las industrias termosolares y el gasto en innovación, que a menudo no está alineado con las estrategias industriales (IEA 2022; DNV, 2024; IEA SHC, 2025). Una evaluación conjunta de la Agencia Internacional de Energía, la Agencia Internacional de Energías Renovables, las Naciones Unidas, el Banco Mundial y la Organización Mundial para la Salud establece que a pesar de su participación, el sector de la termosolaridad ha recibido poca atención (IEA *et al.*, 2025). Finalmente, una exploración a través del abanico de los estudios y reportes proporcionados periódicamente por los cuerpos oficiales aquí mencionados, puede constatar que la energía solar térmica, en general, no se incluye en los despliegues de la matriz energética.

La Figura 4 ejemplifica el marco regular de clasificación en la mezcla del consumo final de las energías renovables, en el cual la norma es agrupar las tecnologías o fuentes relativamente marginales en una cohorte. La participación de las ETP sería en este caso considerada en “otras renovables”, siendo esta última agrupación solamente un bloque de posibles alternativas no propiamente examinadas, pero útiles como un factor de balance general. En el despliegue típico de evaluación, la matriz energética primaria se compone de cada uno de los recursos fósiles y las fuentes nuclear, geotérmica, hidroeléctrica, las bioenergías, el viento y el sol, sin más pormenores de desagregación.

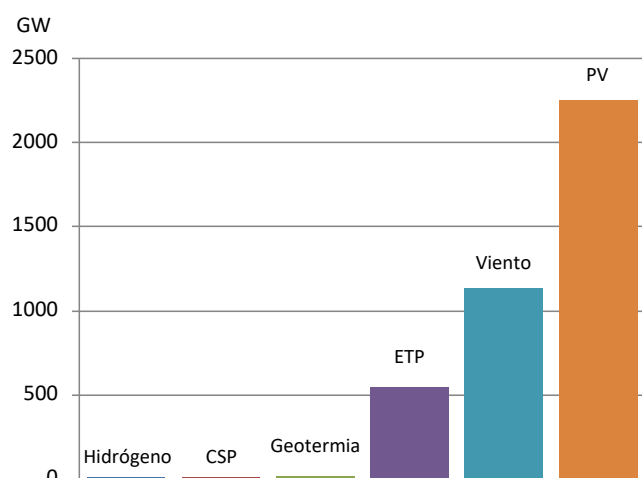


Figura 3: Capacidad instalada global; ETP (GW térmicos), H₂, CSP, viento y PV (GW eléctricos). (IEA SHC, 2025)

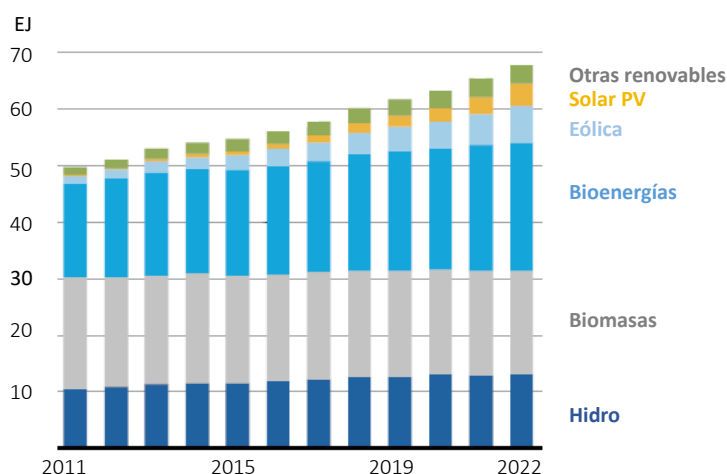


Figura 4: Matriz de consumo global de energía renovable. (IEA, IRENA, UNSD, World Bank, WHO)

Conclusiones

La energía solar se ha consolidado como un término colectivo que abarca diversas tecnologías. Las técnicas de termosolaridad pasiva modernas (ETP) demuestran contar con potencial considerable y presencia en las economías, por lo que pueden ser escaladas para expandir su participación en la mezcla energética global. Las soluciones ETP por lo general son sencillas, prácticas y asequibles, y con un debido impulso de la ingeniería de diseño y la innovación prometen funcionalidad en los diferentes sectores socioeconómicos. No obstante, a pesar de la abundante radiación solar y la operatividad de la termosolaridad, el robusto sector térmico global depende de los combustibles fósiles. A pesar de su importante participación, las tecnologías ETP regularmente no son mencionadas como una categoría separada en las evaluaciones del presente ni en los análisis de escenarios a futuro, y reciben poca atención y apoyo político; fenómeno evidenciado por la misma falta de desarrollo y una mayor penetración. Los datos oficiales sobre el despliegue actual de estas tecnologías son escasos, y no suelen ser agregados en la matriz energética primaria o de suministro y uso final; ni siquiera en las matrices informativas de la mezcla renovable.

Para alcanzar los objetivos globales y acelerar la transición energética, el pleno desarrollo de las energías renovables es un factor crítico; e indudablemente, el desarrollo de políticas centradas en las tecnologías térmicas renovables contiene consideraciones de seguridad energética. Con base en esta situación, en este trabajo propongo que con los avances del movimiento renovable se hace prioritaria la consideración de una iniciativa coordinada conjuntamente por los agentes de desarrollo con las facultades adecuadas, como la academia, entidades consultivas competentes, organismos económicos e industriales para el impulso de las energías termosolares pasivas y sus aplicaciones en las diferentes escalas. Adicionalmente, sugiero que esta adopción de las ETP se vería beneficiada por la creación de una agenda normativa que armonice los posibles aspectos técnicos asociados a las tecnologías, así como por estrategias económicas pertinentes que fertilicen un ambiente financiero favorable para su implementación. Al centro de esta propuesta se sitúa la necesidad de edificar un planteamiento de gestión a favor de las tecnologías termosolares pasivas, y la diseminación de sus posibilidades en virtud de su viabilidad y potencial beneficio tangible. Esto es, propongo la creación de un impulso análogo al de las campañas alternativas económico-energéticas que promueven las baterías modernas, la captura de carbono o el hidrógeno combustible.

Bibliografía

- Bacha, H. B., Joseph, A., Abdullah, A. S., & Sharshir, S. W. (2025). Innovative experimental investigation of a solar dryer with an evacuated tube solar air heater and various thermal energy storage techniques. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, 106018. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106018>
- BloombergNEF. (2025). *New Energy Outlook 2025*. <https://about.bnef.com/>
- Cillari, G., Fantozzi, F., & Franco, A. (2020). Passive solar systems for buildings: Performance indicators analysis and guidelines for the design. *E3S Web of Conferences*, 197, 02008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019702008>
- Cunha, C., Pimenta, T., & Fraga, M. (2022). Development and applications of aluminum nitride thin film technology. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106288>
- DNV. (2024). *Energy Transition Outlook 2024*. <https://www.dnv.com/publications/energy-transition-outlook-2024/>
- EBN (Energie Beheer Nederland). (2024). *Annual Report 2024*. <https://www.ebn.nl/annual-report-2024>
- EIA (U.S. Energy Information Administration). (2025). *International Energy Outlook 2025; Monthly Energy Review, July 2025*. <https://www.eia.gov/>
- Energy Institute. (2025). *Statistical Review of World Energy 2025*. ISBN 9781787254749. <https://www.energyinst.org/statistical-review/home>
- Equinor. (2025). *Energy Perspectives 2025*. <https://www.equinor.com/>
- Ghafoor, A., & Munir, A. (2015). Worldwide overview of solar thermal cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 763–774. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.073>
- Guarino, S., Lo Brano, V., & Kosny, J. (2025). Understanding the transformative potential of solar thermal technology for urban sustainability. *Frontiers in Sustainable Cities*, 7, 1583316. <https://doi.org/10.3389/frsc.2025.1583316>
- Hassan, M. A., & Araj, M. T. (2025). Integrated solar water and air heating: A control-based study for thermally active buildings. *Energy and Buildings*, 345, 116135. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116135>
- IEA. (2022). *Solar Thermal Technologies Deployed in Around 400 Million Dwellings by 2030*. <https://www.iea.org/reports/solar-thermal-technologies-deployed-in-around-400-million-dwellings-by-2030>
- IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- IEA. (2024). *Renewables 2023*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- IEA. (2025). *Global Energy Review 2025*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>
- IEA, IRENA, UNSD, World Bank, & WHO. (2025). *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report*. World Bank. <https://www.irena.org/>
- IEA SHC (Solar Heating and Cooling Programme). (2025). *Solar Heat Worldwide 2025*. <https://www.iea-shc.org/>
- IRENA. (2025). *Renewable Energy Statistics 2025*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/>
- Kalogirou, S. A. (2022). Solar thermal energy: History. In S. Alexopoulos & S. A. Kalogirou (Eds.), *Solar Thermal Energy*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1422-8_1106
- Kren, A., Pilewskie, P., & Coddington, O. (2017). Where does Earth's atmosphere get its energy? *Journal of Space Weather and Space Climate*. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017007>
- Moghadam, T. T., Bruton, K., O'Sullivan, D. T. J., & Norton, B. (2025). Energy efficient achievement of indoor air quality and thermal comfort using mechanical ventilation heat recovery and solar-energy pre-heating. *Energy Conversion and Management*, 327, 119528. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119528>
- Narwal, K., Kempers, R., & O'Brien, P. G. (2025). Enhanced energy storage density in thermal energy storage systems simultaneously heated with solar radiation and industrial waste heat. *Results in Engineering*, 25, 103792. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103792>
- Paltsev, S., & Schlosser, C. A. (2023). *2023 Global Change Outlook*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. <https://cs3.mit.edu/publications/signature/2023-global-change-outlook>
- Senyonyi, B., Mahmoud, H., & Hassan, H. (2025). Systematic review of solar techniques in zero energy buildings. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 27, 727–772. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-03004-9>
- Shell. (2025). *The 2025 Energy Security Scenarios*. <https://www.shell.com/>
- Sornek, K., Papis-Frączek, K., Calise, F., Cappiello, F. L., & Vicidomini, M. (2023). A review of experimental and numerical analyses of solar thermal walls. *Energies*, 16(7), 3102. <https://doi.org/10.3390/en16073102>
- Tillier, E. (2024). *RHC ETIP: European Technology and Innovation Platform on Renewable Heating and Cooling. D5.2 RHC ETIP ID GA 101075746*. <https://www.rhc-platform.org/>

- Toroxel, J., & Silva, S. (2024). A review of passive solar heating and cooling technologies based on bioclimatic and vernacular architecture. *Energies*, 17. <https://doi.org/10.3390/en17051006>
- Usta, Y., Montazeri, A., & Mutani, A. (2025). Feasibility analysis of integrating solar thermal technologies into district heating network with urban building energy modeling. *Energy and Buildings*, 338, 115661. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115661>
- UN DESA. (2025). *Energy Statistics Pocketbook (Series E no. 8)*. <https://unstats.un.org/unsd/energystats/pubs/documents/2025pb-web.pdf>
- Vanegas-Chamorro, et al. (2022). Current status of solar-thermal and solar-photovoltaic technology development at the international level. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(6), 112–122. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13699>
- Weingart, J. M. (1979). Global aspects of sunlight as a major energy source. *Energy*, 4(5), 775–798. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(79\)90011-2](https://doi.org/10.1016/0360-5442(79)90011-2)
- World Energy Council. (2013). *World Energy Resources 2013 Survey*. ISBN 9780946121298. <https://realenergyllc.com/publications/entry/world-energy-resources-2013-survey.html>
- WEC (World Energy Council). (2025). *World Energy Issues Monitor 2025*. <https://www.worldenergy.org/>
- Yasin Kerse, A., Tadele Embiale, D., & Gudeta Gunjo, D. (2025). Dehydration of red chilli using an indirect type forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *International Journal of Thermofluids*, 26, 101045. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101045>

Diseño pasivo y propiedades ópticas: claves para la reducción de la carga térmica en viviendas de climas cálidos subhúmedos

Jordy Jose Alvarado-Pacheco ¹, Antonio José Cantún-May ², Román Alejandro Canul-Turriza ³ y Oscar de Jesús May-Tzuc ^{3,*}

¹ Docente, Academia de Energías Renovables, Tecnológico Nacional de México Campus Progreso, Boulevard Tecnológico de Progreso, S/N x 62, CP.97320, Progreso, Yucatán, México.

² Estudiante, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Predio s/n por Av. Humberto Lanz Cárdenas, Fracc. Siglo XXIII, Av. Exhacienda Kala, C.P. 24085, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

³ Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Predio s/n por Av. Humberto Lanz Cárdenas, Fracc. Siglo XXIII, Av. Exhacienda Kala, C.P. 24085, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

* Autor de correspondencia: oscaymay@uacam.mx

Desarrollo Sustentable (Bioconstrucción)

Recibido: 23 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 27 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.631>

Resumen: El sector de la edificación es uno de los principales consumidores de energía a nivel mundial, debido a la alta demanda de climatización necesaria para garantizar el confort térmico. En México, gran parte de las viviendas en climas cálidos carecen de aislamiento, lo que incrementa la dependencia de sistemas de aire acondicionado y, con ello, el consumo energético. Ante este panorama, resulta esencial evaluar el desempeño térmico de los elementos de la envolvente, considerando sus propiedades termofísicas y ópticas, así como la orientación de muros y techos. Este estudio empleó el software Opaque para simular techos y muros con distintas configuraciones constructivas y valores de absorptancia (0.1–0.9). Se analizaron tres sistemas de cubierta (convencional, con aislamiento de poliestireno expandido y con poliestireno extruido), así como muros orientados al norte, sur, este y oeste. El objetivo fue comparar la evolución horaria de la temperatura sol-aire y las ganancias de calor en condiciones representativas de climas cálidos. Los resultados muestran que los techos convencionales de concreto alcanzan temperaturas superficiales cercanas a 65 °C, con ganancias de calor superiores a 70 W/m². En contraste, la incorporación de aislamientos, especialmente de poliestireno extruido, reduce significativamente la transferencia térmica, con máximos inferiores a 35 W/m². Respecto a los muros, la orientación oeste resulta la más crítica, registrando temperaturas de hasta 65 °C y ganancias de calor superiores a 100 W/m², debido a la coincidencia de la radiación solar vespertina con las horas de mayor temperatura ambiental. Por el contrario, las orientaciones norte y sur presentaron un comportamiento más moderado, con menores cargas térmicas. En conclusión, la incorporación de aislamientos en techos y pinturas reflejantes en muros, particularmente en orientaciones críticas como la oeste, constituyen estrategias efectivas para mejorar el confort térmico y reducir el consumo energético en edificaciones de climas cálidos.

Palabras clave: Absorptancia solar, Diseño pasivo, Ecotecnologías, Temperatura sol-aire

Passive design and optical properties: keys to reducing thermal load in housing for warm subhumid climates

Abstract: The building sector is one of the largest consumers of energy worldwide, due to the high demand for air conditioning required to ensure thermal comfort. In Mexico, many homes in warm climates lack insulation, which increases dependence on air-conditioning systems and, consequently, energy consumption. In this context, it is essential to evaluate the thermal performance of building envelope elements, considering their thermophysical and optical properties, as well as the orientation of walls and roofs. This study used Opaque software to simulate roofs and walls with different construction configurations and absorptance values (0.1–0.9). Three roof systems were analyzed: conventional, with expanded polystyrene insulation, and with extruded polystyrene insulation, along with walls oriented to the north, south, east, and west. The objective was to compare the hourly evolution of surface-air temperature and heat gains under conditions representative of warm climates. Results show that conventional concrete roofs reach surface temperatures close to 65 °C, with heat gains exceeding 70 W/m². In contrast, the incorporation of insulation, particularly extruded polystyrene, significantly reduces thermal transfer, with maximum heat gains below 35 W/m². Regarding walls, the west orientation is the most critical, registering temperatures up to 65 °C and heat gains above 100 W/m², due to the coincidence of afternoon solar radiation with peak ambient temperatures. Conversely, north- and south-facing walls exhibited more moderate behavior, with lower thermal loads. In conclusion, the use of roof insulation and reflective wall coatings, particularly in critical orientations such as west, constitutes an effective strategy to improve thermal comfort and reduce energy consumption in buildings located in warm climates.

Keywords: Solar absorptance, Passive design, Ecotechnologies, Sol-air temperature

Introducción

De acuerdo con el informe 2024 de la Agencia Internacional de Energía (IEA), el sector de la edificación representa el 28 % del consumo final de energía a nivel mundial, lo que lo posiciona como el segundo mayor consumidor, solo detrás de la industria, que concentra un 38 % (IEA, 2024). Este elevado consumo se atribuye principalmente a los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), indispensables para mantener condiciones de confort térmico en los espacios interiores. En respuesta a esta situación, en los últimos años numerosos países han implementado normativas de eficiencia energética en el sector de la edificación, con el objetivo de reducir el consumo excesivo de energía. En este contexto, varios países han desarrollado regulaciones específicas para optimizar el uso de la energía en edificios (UNEP & GlobalABC, 2024).

Un ejemplo es México, donde desde 2011 está vigente la norma NOM-020-ENER-2011, que regula la ganancia de calor a través de la envolvente en edificaciones residenciales (NOM-020-ENER-2011, 2011). No obstante, el consumo energético de una vivienda está influenciado por múltiples factores, entre los que se incluyen la eficiencia de los equipos instalados, el número de ocupantes, los patrones y hábitos de uso, las condiciones climáticas de la región y las características constructivas. Cabe señalar que, aunque esta norma representa un avance significativo, se enfoca exclusivamente en la regulación de la ganancia de calor mediante la envolvente térmica, sin considerar otros aspectos relevantes como las propiedades ópticas de los materiales.

En este sentido, de acuerdo con un estudio realizado por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) y la Secretaría de Energía (SENER), el territorio mexicano se clasifica en dos grandes regiones climáticas: cálida, con temperaturas medias anuales entre 24 y 28 °C, y templada, con valores inferiores a dicho rango. A partir de esta clasificación, se estimó que las viviendas ubicadas en zonas de clima templado, que representan aproximadamente el 55 % de los usuarios, presentan un consumo promedio de alrededor de 1,000 kWh/año por vivienda. Por el contrario, las viviendas localizadas en regiones cálidas, que corresponden al 45 % de los usuarios, registran consumos superiores al doble, con un promedio de 2,300 kWh/año por vivienda (CONUEE & SENER, 2020).

Se estima que más del 35 % del consumo eléctrico del sector residencial en México se destina a lograr el confort térmico, principalmente mediante sistemas HVAC. A pesar de ello, el uso de aislamiento térmico en viviendas es escaso. Se calcula que aproximadamente el 95 % de las edificaciones carece de este recurso. La Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) clasifica al país en tres regiones climáticas: cálida extrema, templada y tropical. En la región cálida extrema, el 85 % de las viviendas no cuenta con aislamiento; en la región tropical, la cifra asciende a 98.5 %, convirtiéndola en la más vulnerable (INEGI, 2018; Rosas-Flores, 2020). Esta carencia incrementa la dependencia del aire acondicionado para alcanzar niveles de confort, lo que eleva significativamente el consumo energético.

En el sureste de México, la construcción de muros se realiza mayoritariamente con mampostería de block de concreto, mientras que en las losas predomina el sistema de vigueta y bovedilla. Ambos presentan alta conductividad térmica, condición poco adecuada para climas cálidos, ya que favorece la transferencia de calor hacia el interior. Ante esta problemática, resulta esencial impulsar ecotecnologías y estrategias bioclimáticas que, además de cumplir con la normativa, mejoren el desempeño térmico y favorezcan el confort interior (Jiménez Torres *et al.*, 2023).

Las ecotecnologías representan una alternativa eficaz para reducir tanto el consumo energético como los costos de operación (FIDE, 2022). Diversos estudios demuestran que la incorporación de aislamientos térmicos (Bashir & Leite, 2022), impermeabilizantes y acabados reflectivos (Han *et al.*, 2022) disminuye la ganancia de calor en el interior de las edificaciones, incrementando su eficiencia energética. Para maximizar su impacto, es recomendable integrarlos desde la fase de diseño. Asimismo, la orientación de la edificación influye de manera significativa en el ahorro energético (Galindo-Borbón *et al.*, 2024). Investigaciones recientes señalan que, en climas tropicales, el uso de recubrimientos reflectivos puede superar el desempeño de los aislamientos térmicos en términos de eficiencia energética y cumplimiento normativo (Jiménez Torres *et al.*, 2024).

La limitada adopción de ecotecnologías y estrategias bioclimáticas en el diseño y construcción ha contribuido al incremento del consumo energético en edificaciones, especialmente por la elevada demanda de sistemas HVAC. En este contexto, el presente trabajo propone una representación gráfica que evalúa el impacto de distintos elementos

constructivos en la ganancia térmica de una edificación. Este análisis busca evidenciar las diferencias en el comportamiento energético según sus propiedades ópticas y orientación, con el fin de identificar oportunidades concretas para optimizar el diseño pasivo y reducir el consumo energético en climas cálidos.

Materiales y Métodos

En la Figura 1 se observa la metodología que se encuentra estructurada en tres etapas: base de datos, ejecución y discusión de resultados. En la primera, se recopilaron propiedades termofísicas y ópticas de materiales, coeficientes de absorción y datos de orientación como parte de las ecotecnologías y estrategias bioclimáticas. En la segunda, la información fue procesada en el software Opaque para modelar muros y losas, simulando distintos valores de absorción. Finalmente, los resultados se representaron gráficamente para comparar el desempeño térmico y determinar configuraciones que minimicen la ganancia de calor en climas cálidos.

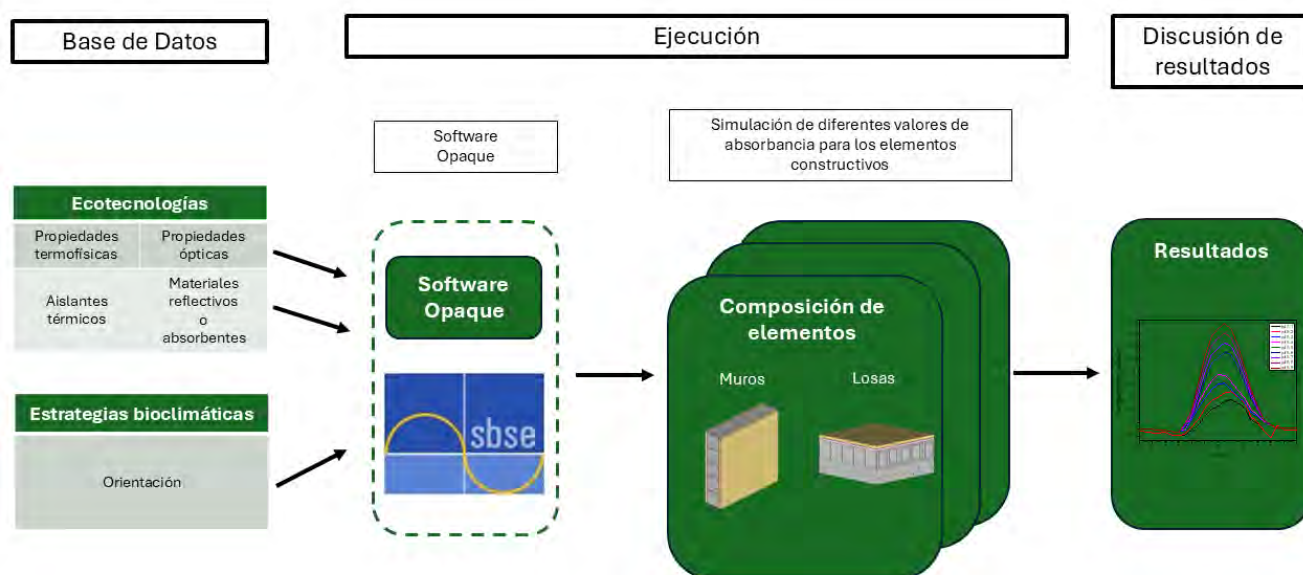


Figura 1. Metodología de simulación y análisis de elementos constructivos mediante software Opaque

Base de datos

Se definieron las propiedades termofísicas de los materiales de construcción empleados en la región, así como de materiales alternativos enfocados en mejorar la eficiencia energética de los elementos constructivos. Para las ecotecnologías, se consideraron parámetros como la conductividad térmica (k), el calor específico (C_p), la densidad (ρ), el espesor y las propiedades ópticas de cada material. En el caso de las estrategias bioclimáticas, el análisis incorporó principalmente la variable de orientación de la edificación, debido a su impacto en la ganancia térmica por radiación solar. La definición de los elementos constructivos se realizó mediante el software Opaque, el cual permite ingresar datos detallados de espesor, propiedades termofísicas y ópticas de los materiales. Posteriormente, se efectuaron simulaciones empleando datos meteorológicos correspondientes a un día tipo, seleccionado específicamente del mes más cálido (mayo) y del mes más frío (enero) en la ciudad de San Francisco de Campeche.

Estas simulaciones tuvieron como objetivo estimar y registrar, para cada elemento constructivo, la ganancia energética por conducción y radiación. Adicionalmente, se incorporaron aspectos ópticos como la absorción (α) y la reflectancia (ρ) de los materiales, con el fin de evaluar la efectividad de implementar recubrimientos reflectantes como estrategia para reducir la ganancia de calor al interior de los edificios. El software no solo genera resultados cuantitativos, sino que también dispone de un panel gráfico que permite visualizar el aspecto y la orientación de cada elemento. Entre los resultados obtenidos se incluyen la temperatura sol-aire (o temperatura equivalente), la radiación global, directa, difusa, así como la radiación reflejada por el entorno hacia el edificio. En la Tabla 1 se presentan las propiedades termofísicas de los materiales considerados en la simulación, incluyendo materiales convencionales y aquellos destinados a mejorar el desempeño térmico de la envolvente.

Tabla 1. Propiedades termofísicas de los materiales utilizados en la simulación

Material	Conductividad térmica (W/m·K)	Calor específico (J/kg·K)	Densidad (kg/m ³)
Concreto armado	1.74	1000	2400
Vigüeta y bovedilla	0.50	1000	1400
Poliestireno expandido (EPS)	0.037	1400	16
Poliestireno extruido (XPS)	0.028	1260	30
Estuco	0.726	880	1920

Diferentes combinaciones para edificios de referencia

Durante el proceso de simulación, se generaron distintas combinaciones de elementos constructivos con el fin de aproximarse a valores representativos y evaluar su impacto en el comportamiento energético del edificio de referencia como se observa en la Tabla 2. Para cada caso, se compiló la información sobre cómo variaba el desempeño energético de los elementos al modificar la composición de sus materiales, sus propiedades ópticas y su orientación. Este análisis permitió identificar las combinaciones con mayor potencial de ahorro energético, las cuales fueron seleccionadas para un estudio detallado que profundiza en su eficacia y viabilidad de implementación.

Tabla 2. Configuraciones de elementos constructivos y rangos de absorbancia utilizados en la simulación energética

Caso	Escenario	Descripción	Absorbancia
T1	I	Techo convencional	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
T2	I	Techo con capa de poliestireno expandido (EPS)	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
T3	I	Techo con capa de poliestireno extruido (XPS)	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9

Continuación Tabla 2. Configuraciones de elementos constructivos y rangos de absorbancia utilizados en la simulación energética

Caso	Escenario	Descripción	Absorbancia
MN	I	Muro con orientación al norte	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
ME	I	Muro con orientación al este	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
MO	I	Muro con orientación al oeste	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9
MS	I	Muro con orientación al sur	0.1
	II		0.2
	III		0.3
	IV		0.4
	V		0.5
	VI		0.6
	VII		0.7
	VIII		0.8
	IX		0.9

Análisis de resultados

El análisis se centra en cada elemento constructivo seleccionado, con el propósito de evaluar su optimización mediante la modificación de sus propiedades ópticas. Este procedimiento permite identificar las combinaciones o alternativas más eficaces en términos de ahorro energético, al favorecer una menor transferencia de calor hacia el interior y, en consecuencia, reducir la huella de carbono mediante la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Asimismo, se examina la idoneidad y aplicabilidad de los materiales propuestos frente a las condiciones climáticas de la región, considerando no solo su desempeño térmico, sino también su viabilidad de implementación en proyectos constructivos reales.

Resultados y Discusión

En la Figura 2 se observa la comparación entre las temperaturas sol-aire y las ganancias de calor para los tres sistemas de cubierta evaluados. El Techo 1 (sistema convencional de concreto con vigueta y bovedilla) alcanza temperaturas superficiales cercanas a 65 °C durante las horas de máxima radiación, aproximadamente a las 14:00 horas. Este techo presenta un retardo térmico moderado, característico de la alta inercia térmica del concreto, lo que provoca que el flujo de calor hacia el interior se incremente en las últimas horas de la tarde. Las ganancias de calor superan los 70 W/m², lo que implica que, aunque el material retrasa el flujo de energía, la magnitud del calor transferido al interior es elevada, aumentando de manera considerable la carga térmica del edificio y la dependencia de sistemas de climatización.

En contraste, el Techo 2, que incorpora una capa de poliestireno expandido (EPS) como aislante, evidencia una disminución significativa en la transferencia térmica. Aunque las temperaturas superficiales se mantienen en niveles similares a los del techo convencional, las curvas de ganancias de calor muestran reducciones sustanciales, con valores máximos en torno a 22–24 W/m². Esto refleja la capacidad del EPS para limitar el flujo de calor hacia el interior, reduciendo notablemente el impacto de la radiación solar en la carga térmica del espacio habitable. Además, el desfase entre el pico de radiación y la ganancia máxima es más pronunciado, lo que contribuye a atenuar las condiciones térmicas durante las horas críticas y a disminuir el uso de sistemas mecánicos de enfriamiento.

Por su parte, el Techo 3, que incorpora una capa de poliestireno extruido (XPS), también logra una reducción considerable en la transferencia de calor, con ganancias máximas que oscilan entre 30 y 35 W/m². Sin embargo, en esta simulación su desempeño es ligeramente inferior al observado en el techo con EPS, a pesar de que el XPS cuenta con una menor conductividad térmica y mayor resistencia a la humedad. Este resultado sugiere que factores como la ubicación de la capa aislante, su espesor o las propiedades ópticas de las superficies pueden influir significativamente en el comportamiento dinámico del sistema. Aun así, el techo con XPS ofrece una mejora térmica relevante respecto al techo convencional y mantiene un comportamiento estable a lo largo del día, especialmente cuando se combina con acabados de alta reflectancia superficial.

Estos hallazgos se relacionan directamente con la NOM-020-ENER-2011 (NOM-020-ENER-2011, 2011), la cual establece los lineamientos para limitar la ganancia de calor por la envolvente de edificios de uso habitacional. De acuerdo con esta norma, es fundamental integrar materiales con baja conductividad térmica y, de ser posible, con propiedades reflectivas, con el fin de reducir la transferencia de calor al interior de las viviendas. En este sentido, tanto el EPS como el XPS cumplen con la normativa, contribuyendo a la reducción de las cargas térmicas y al cumplimiento de las metas nacionales en materia de eficiencia energética. El techo convencional, al carecer de aislamiento, no satisface los parámetros establecidos por la norma, lo que justifica la necesidad de incorporar ecotecnologías para mejorar el desempeño térmico de la envolvente.

Desde la perspectiva de factibilidad económica, el costo de implementación es un factor determinante para la selección del material aislante. El EPS tiene un costo aproximado de \$22/m², mientras que el XPS asciende a \$55/m², lo que puede influir en la decisión final dependiendo del presupuesto disponible para la construcción o rehabilitación. Sin embargo, la elección no debe basarse únicamente en el precio, ya que es necesario considerar otros aspectos como la ligereza del material, su resistencia mecánica, la baja absorción de agua y la durabilidad. El EPS representa una alternativa económica y eficiente para la reducción de las ganancias de calor, mientras que el XPS, aunque más costoso, ofrece ventajas en términos de resistencia estructural y desempeño en condiciones de alta humedad, características relevantes en climas como el de San Francisco de Campeche, donde la presencia de humedad es significativa.

En general, se confirma que la incorporación de aislamiento térmico, en conjunto con acabados reflectantes, es la estrategia más eficaz para reducir la ganancia de calor. De los sistemas analizados, el techo con EPS (Techo 2) resultó ser el más eficiente en términos de reducción de flujo térmico, seguido por el techo con XPS (Techo 3), mientras que el sistema convencional (Techo 1) presentó los mayores niveles de transferencia de calor. Estos resultados no solo demuestran la pertinencia técnica, sino también la viabilidad normativa y económica de implementar soluciones constructivas que mejoren la eficiencia energética y el confort interior, reduciendo la dependencia de sistemas mecánicos de climatización y contribuyendo al cumplimiento de los objetivos planteados por la NOM-020-ENER-2011.

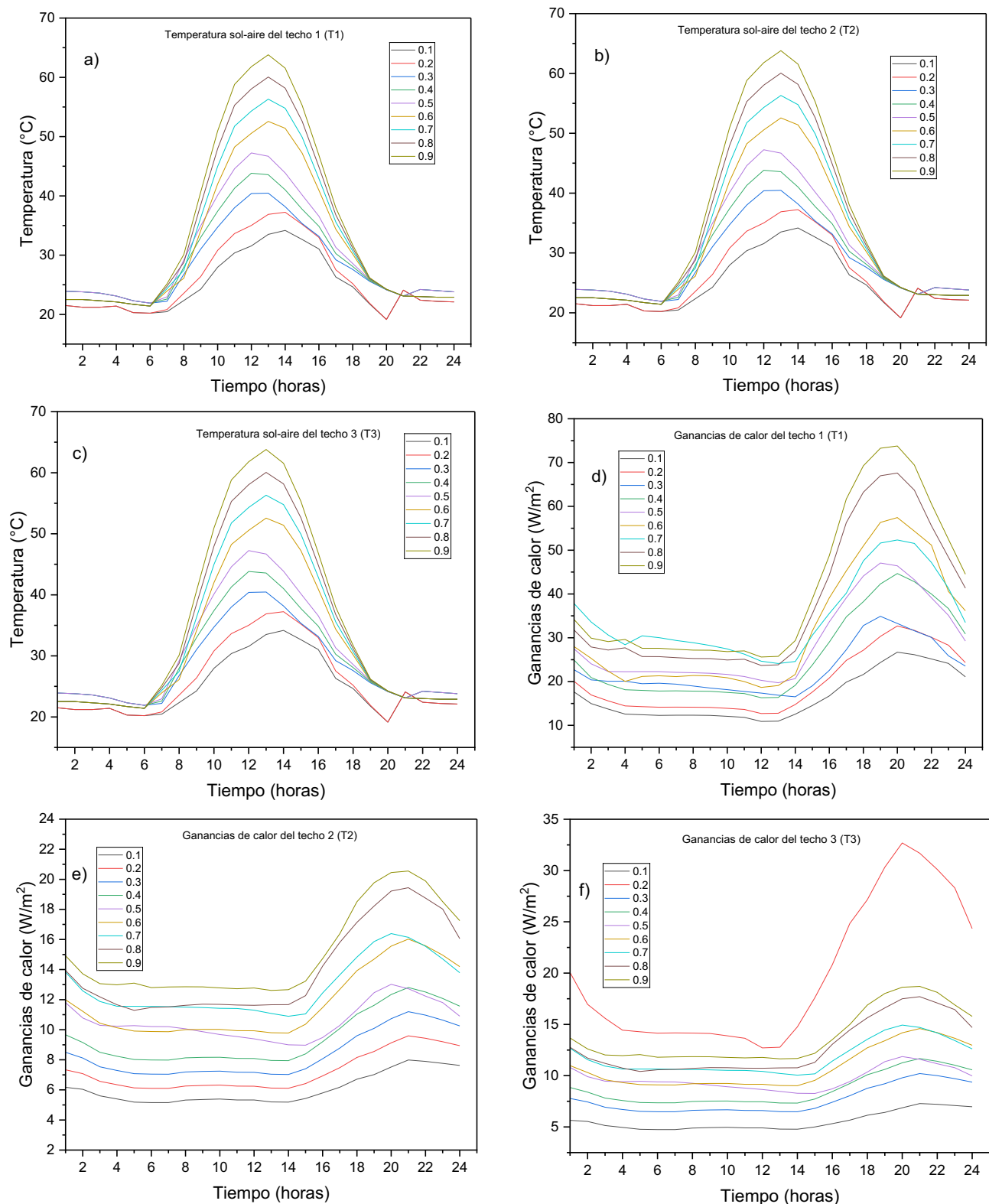


Figura 2. Temperatura sol-aire y ganancias de calor en los tres sistemas de techo con variación de la absorbancia solar; a) temperatura sol-aire del techo convencional, b) temperatura sol-aire del techo con capa de poliestireno expandido (EPS), c) temperatura sol-aire del techo con capa de poliestireno extruido (XPS), d) ganancias de calor del techo convencional, e) ganancias de calor del techo con capa de poliestireno expandido (EPS) y f) ganancias de calor del techo con poliestireno extruido (XPS)

En la Figura 3 se observa la evolución horaria de la temperatura sol-aire y de las ganancias de calor a través de muros con distintas orientaciones (Norte, Este, Oeste y Sur), bajo variaciones en el coeficiente de absorbanza superficial (0.1 a 0.9). En el muro norte (a, e) se observa un comportamiento moderado en comparación con las demás orientaciones. La temperatura superficial máxima alcanza aproximadamente 45–50 °C hacia el mediodía, con un desfase térmico respecto al pico de radiación solar. Las ganancias de calor muestran un incremento sostenido entre las 10:00 y 18:00 h, alcanzando valores cercanos a 65 W/m² en las condiciones de mayor absorbanza. Esto refleja que, aunque el muro norte recibe radiación indirecta y difusa, la acumulación térmica durante el día es significativa, especialmente en superficies con alta absorbanza.

El muro este (b, f) exhibe un aumento rápido de temperatura en las primeras horas de la mañana, alcanzando picos de 50–55 °C alrededor de las 10:00 h. Este comportamiento responde a la incidencia directa de la radiación solar durante el amanecer y las primeras horas del día. Las ganancias de calor siguen esta misma tendencia, con un máximo próximo a 70 W/m², lo que sugiere que este muro contribuye a la carga térmica interior en las horas de ocupación inicial, pudiendo impactar en el confort térmico matutino.

En el caso del muro oeste (c, g) se presenta el escenario más crítico. La temperatura superficial alcanza los valores más elevados, cercanos a 60–65 °C, con el máximo alrededor de las 16:00–18:00 h, coincidiendo con las horas de mayor temperatura ambiente. Las ganancias de calor son igualmente elevadas, con picos que superan los 100 W/m² en condiciones de alta absorbanza. Este fenómeno se explica por la superposición de la radiación solar vespertina con el máximo nivel térmico del aire exterior, lo que convierte al muro oeste en el más desfavorable desde el punto de vista de confort y eficiencia energética.

Por último, el muro sur (d, h) presenta un comportamiento intermedio. Sus temperaturas superficiales alcanzan valores alrededor de 40–50 °C, con picos cercanos al mediodía. Las ganancias de calor son más moderadas, situándose en el rango de 50–70 W/m², dependiendo de la absorbanza. A diferencia del muro este y oeste, la contribución del muro sur se distribuye de forma más equilibrada a lo largo del día, aunque con menor intensidad.

En todos los casos, se confirma que la absorbanza superficial, es un factor determinante en el comportamiento térmico de los muros. Valores elevados de α intensifican la absorción de radiación solar, incrementando tanto la temperatura superficial como las ganancias de calor, mientras que valores bajos mitigan estos efectos. El análisis comparativo pone de manifiesto que, de las orientaciones evaluadas, el muro oeste constituye el punto más crítico en términos de carga térmica, seguido del muro este, mientras que las orientaciones norte y sur muestran un impacto relativamente menor.

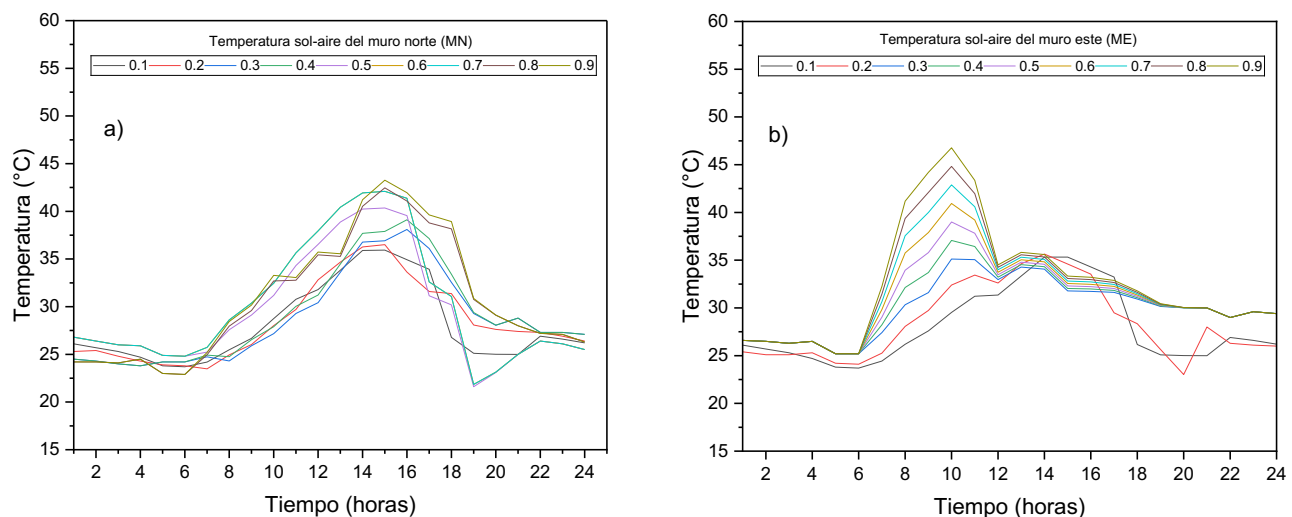
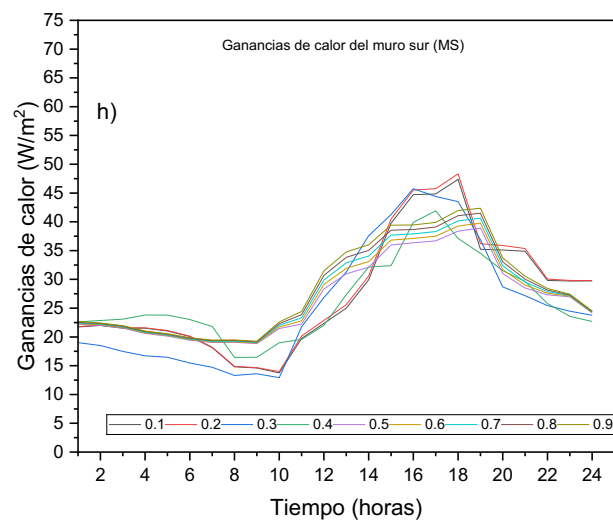
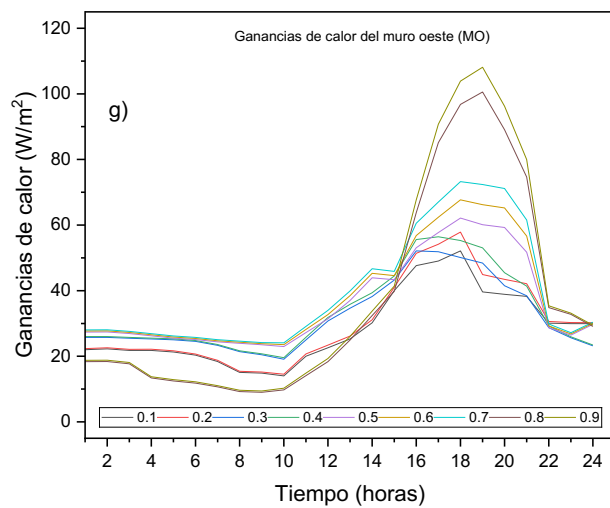
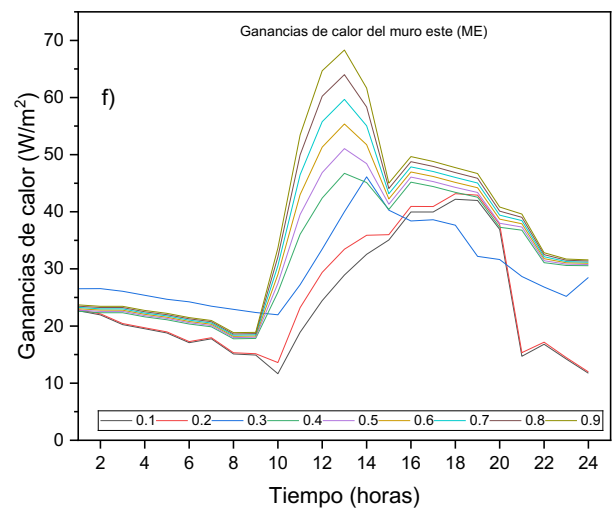
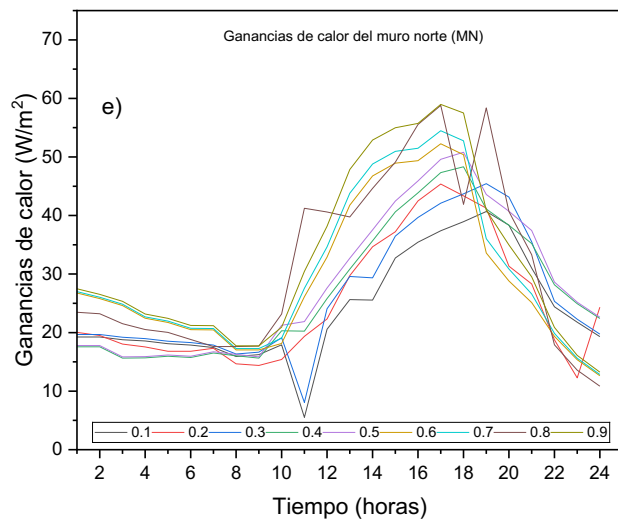
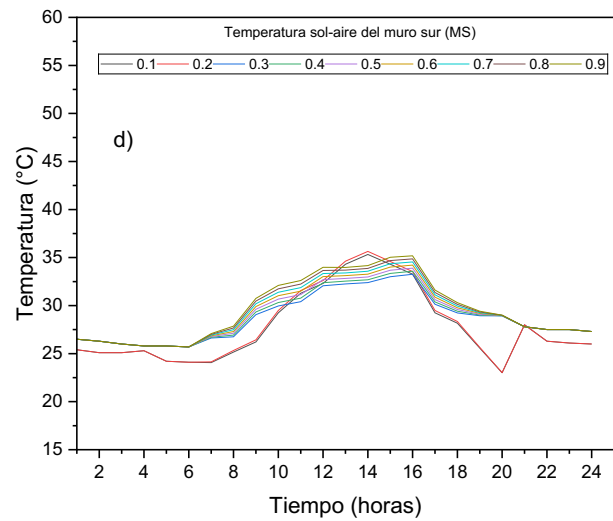
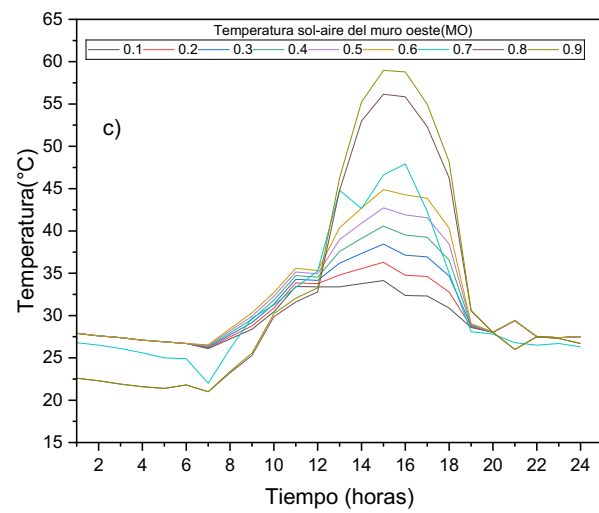


Figura 3. Evolución horaria de la temperatura sol-aire y las ganancias de calor en muros con diferentes orientaciones y absorbanza: a) temperatura sol-aire del muro norte, b) temperatura sol-aire del muro este, c) temperatura sol-aire del muro oeste, d) temperatura sol-aire del muro sur, e) ganancia de calor del muro norte, f) ganancia de calor del muro este, g) ganancia de calor del muro oeste y h) ganancia de calor del muro sur



Continuación Figura 3. Evolución horaria de la temperatura sol-aire y las ganancias de calor en muros con diferentes orientaciones y absorbancia: a) temperatura sol-aire del muro norte, b) temperatura sol-aire del muro este, c) temperatura sol-aire del muro oeste, d) temperatura sol-aire del muro sur, e) ganancia de calor del muro norte, f) ganancia de calor del muro este, g) ganancia de calor del muro oeste y h) ganancia de calor del muro sur

Conclusiones

El análisis comparativo de techos y muros con diferentes configuraciones constructivas y orientaciones permitió identificar el impacto que tienen los materiales, el aislamiento térmico y la absorbancia superficial en el desempeño térmico de la envolvente edilicia. En el caso de los techos, se evidenció que el sistema convencional de concreto con vigueta y bovedilla presenta las mayores ganancias de calor, mientras que la incorporación de materiales aislantes, particularmente el poliestireno expandido (EPS), reduce de manera significativa la transferencia térmica hacia el interior. Esto contribuye a mejorar las condiciones de confort de los ocupantes y a disminuir la demanda energética en climatización, en concordancia con los lineamientos establecidos por la NOM-020-ENER-2011, que promueve la eficiencia energética en edificaciones habitacionales mediante la reducción de la ganancia térmica en la envolvente.

Por su parte, el análisis de los muros mostró que la orientación juega un papel fundamental en el comportamiento térmico. El muro oeste resultó ser el más crítico, ya que coincide la incidencia de radiación solar vespertina con las temperaturas máximas del aire, lo que genera los mayores valores de temperatura superficial y ganancias de calor. En contraste, las orientaciones norte y sur presentaron un impacto más moderado, mientras que el muro este mostró relevancia durante las primeras horas de la mañana. En todos los casos, se corroboró que un mayor coeficiente de absorbancia incrementa la carga térmica, mientras que valores bajos contribuyen a mitigar los efectos de la radiación solar, destacando la importancia de recubrimientos reflectivos como estrategia complementaria.

No obstante, es importante señalar que este estudio se basa en simulaciones computacionales, lo que implica que los resultados obtenidos representan un escenario controlado. Por ello, se considera necesario que en futuras investigaciones se realicen mediciones en campo para validar y ajustar los modelos, incorporando factores como la variabilidad climática, el comportamiento real de los materiales y las condiciones de uso de las viviendas. Esto permitirá mejorar la precisión y aplicabilidad de los resultados, proporcionando recomendaciones más sólidas para la implementación de estrategias constructivas que contribuyan al cumplimiento de la NOM-020-ENER-2011 y a la mejora del confort térmico en regiones cálidas como San Francisco de Campeche.

Agradecimientos y financiamiento: Al Laboratorio de Habitabilidad y Diseño Urbano Sustentable de la UACAM. También al respaldo del proyecto 15/UACAM/2024.

Bibliografía

- Bashir, A. W., & Leite, B. C. C. (2022). Performance of aerogel as a thermal insulation material towards a sustainable design of residential buildings for tropical climates in Nigeria. *Energy and Built Environment*, 3(3), 291–315. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.02.003>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), & Secretaría de Energía (SENER). (2020). *Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México*. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvciclo.pdf> (Consultado el 10 de julio del 2025)
- Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE). (2022). *Eficiencia Energética - Revista del Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica*. https://www.fide.org.mx/wp-content/uploads/Revistas/eficiencia_energetica_34.pdf (Consultado el 10 de junio del 2025)
- Galindo-Borbón, C., Borbón-Almada, A., Ochoa-de-la-Torre, J. M., & Marincic-Lovriha, I. (2024). Análisis costo-beneficio de estrategias para eficiencia energética en vivienda, aplicando la normatividad vigente en el Noroeste de México. *Revista Hábitat Sustentable*, 14(2), 32–47. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.02.03>
- Han, D., Fei, J., Mandal, J., Liu, Z., Li, H., Raman, A. P., & Ng, B. F. (2022). Sub-ambient radiative cooling under tropical climate using highly reflective polymeric coating. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 240, 111723. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111723>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Secretaría de Energía (SENER), & Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2018). *Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI)*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/encevi/2018/doc/encevi2018_presentacion_resultados.pdf (Consultado el 15 de julio del 2025)
- International Energy Agency (IEA). (2024). *World Energy Outlook 2024*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf> (Consultado el 12 de julio del 2025)
- Jiménez Torres, M., Bienvenido-Huertas, D., May Tzuc, O., Bassam, A., Ricalde Castellanos, L. J., & Flota-Bañuelos, M. (2023). Assessment of climate change's impact on energy demand in Mexican buildings: Projection in single-family houses based on Representative Concentration Pathways. *Energy for Sustainable Development*, 72, 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.012>
- Jiménez Torres, M., Pérez-Fargallo, A., May Tzuc, O., Ricalde Castellanos, L., Bassam, A., Flota-Bañuelos, M., & Rubio-Bellido, C. (2024). Energy poverty under 2M indicator: Feasibility of decrease by using passive techniques in residential buildings of Southeast Mexico. *Energy and Buildings*, 323, 114761. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114761>
- NOM-020-ENER-2011. (2011). *Eficiencia energética en edificaciones: Envolvente de edificios para uso habitacional*. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM_020_ENER_2011.pdf (Consultado el 10 de junio del 2025)

- Rosas-Flores, J. A., & Rosas-Flores, D. (2020). Potential energy savings and mitigation of emissions by insulation for residential buildings in Mexico. *Energy and Buildings*, 209, 109698. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109698>
- United Nations Environment Programme (UNEP), & Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC). (2024). *Global status report for buildings and construction: Beyond foundations*. Nairobi. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/45095/global_status_report_buildings_construction_2023.pdf (Consultado el 30 de julio del 2025)

Producción de bioestimulantes de crecimiento de especies de uso forestal y comercial a partir del proceso de biotransformación de granos gastados de cerveza artesanal con *Lactobacillus rhamnosus*

Phoebe Sabrina Rodríguez-Ortega, Joaquín Estrada-García, Alejandro Alvarado-Lassman, Juan Manuel Méndez-Contreras *

Laboratorio Ambiental II, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México /Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: juan.mc@orizaba.tecnm.mx; Tel.: (+52) 2721115889

Desarrollo Sustentable (Bioprocesos)

Recibido: 2 de abril de 2025

Aceptado: 3 de junio de 2025

Publicado: 27 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.414>

Resumen: Este trabajo presenta el proceso fermentativo probiótico realizado con *Lactobacillus rhamnosus* al que fueron sometidos residuos lignocelulósicos, granos gastados de cerveza artesanal, generando un producto de valor agregado como lo son bioestimulantes para su posterior aplicación en especies comerciales y forestales. Se realizó la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los granos gastados de cerveza artesanal (GGCA) obtenidos de la cervecera Altas Cervezas Brewing Co. perteneciente a la región de Orizaba, Veracruz. El análisis demostró que este residuo lignocelulósico tiene un alto contenido de carbohidratos con 14.89 g/L, 19.60 % de proteínas, 3.14 % de nitrógeno total, 3.04 % de sólidos totales, 2.97 % de sólidos volátiles y un pH de 5. La fermentación de los GGCA se realizó mediante un proceso anaerobio con *Lactobacillus rhamnosus* operado en modo batch durante 3 días con las condiciones iniciales de un pH de 7, en agitación constante y a una temperatura de 37 °C. El proceso de fermentación se realizó con un inóculo del *Lactobacillus rhamnosus* al 5 % presentando una degradación de carbohidratos por parte del *Lactobacillus rhamnosus* conforme el tiempo transcurría permitiendo un crecimiento celular de alrededor de 8 Log UFC/mL. El contenido inicial de carbohidratos de la dilución de los GGCA al inicio del proceso fermentativo fue de 16.28 g/L disminuyendo a 5.5 g/L al final de la fermentación, demostrando una notoria degradación por parte del *Lactobacillus rhamnosus* permitiendo la producción de ácido láctico. El contenido de ácido láctico fue determinado mediante la técnica descrita en la NOM-420-S-1982 obteniéndose un valor de 54 g/L al finalizar el proceso fermentativo. A partir de los resultados obtenidos se concluye que gracias a la composición de los GGCA y a la naturaleza heterofermentativa del *Lactobacillus rhamnosus* permiten la obtención de productos de interés como lo es el ácido láctico que brinda beneficios para la regulación de materia orgánica en los suelos y en los ciclos bioquímicos de las plantas.

Palabras clave: fermentación, residuos lignocelulósicos, bioestimulante, *L. rhamnosus*

Production of growth biostimulants for forest and commercial species through the biotransformation of spent grains from artisanal beer using *Lactobacillus rhamnosus*

Abstract: This work presents a probiotic fermentation process carried out with *Lactobacillus rhamnosus*, applied to lignocellulosic residues, specifically spent grains from artisanal beer, generating a value-added product such as biostimulants for subsequent application in commercial and forest species. Physicochemical and microbiological characterization of the artisanal beer spent grains (ABSG) obtained from Altas Cervezas Brewing Co., located in the Orizaba region, Veracruz, was performed. The analysis showed that this lignocellulosic residue has a high carbohydrate content of 14.89 g/L, 19.60% protein, 3.14% total nitrogen, 3.04% total solids, 2.97% volatile solids, and a pH of 5. Fermentation of the ABSG was conducted through an anaerobic batch process using *Lactobacillus rhamnosus* over a period of 3 days, under initial conditions of pH 7, constant agitation, and a temperature of 37 °C. The fermentation process was carried out with a 5% *Lactobacillus rhamnosus* inoculum, showing carbohydrate degradation by *Lactobacillus rhamnosus* over time and allowing cell growth of approximately 8 log CFU/mL. The initial carbohydrate content of the ABSG dilution at the beginning of the fermentation process was 16.28 g/L, decreasing to 5.5 g/L at the end of fermentation, demonstrating significant degradation by *Lactobacillus rhamnosus* and enabling lactic acid production. Lactic acid content was determined using the method described in NOM-420-S-1982, obtaining a value of 54 g/L at the end of the fermentation process. Based on the results obtained, it is concluded that the composition of ABSG and the heterofermentative nature of *Lactobacillus rhamnosus* enable the production of compounds of interest such as lactic acid, which provides benefits for the regulation of organic matter in soils and in plant biochemical cycles.

Keywords: fermentation, lignocellulosic residues, biostimulant, *L. rhamnosus*

Introducción

El aumento de la población ha incrementado la demanda en el sector agroindustrial, lo que ha llevado a acumular residuos lignocelulósicos que dañan el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente. Estos residuos, que contienen lignina, hemicelulosa y celulosa, pueden ser utilizados por las empresas mediante métodos como compostaje y fermentación, generando productos valiosos como bioestimulantes, biofertilizantes, bioenergía y compostaje (Assandri *et al.*, 2020). La economía circular se propone como una alternativa al sistema lineal actual, ofreciendo oportunidades comerciales y beneficios ambientales al convertir residuos en recursos útiles (León, 2022). Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en 2023, México lideró la producción de cerveza en el sector agroindustrial, generando un superávit de 343 MDD (SIAP, 2023). Este sector es importante para la economía y el empleo, ya que México ocupa el cuarto lugar mundial en producción de cerveza, con alrededor de 125 millones de hectolitros producidos en 2019 (Vázquez-Alfaro *et al.*, 2022). Sin embargo, la producción de cerveza también genera grandes cantidades de residuos, como aguas residuales y granos gastados, que tienen un impacto negativo en el medio ambiente (Santacruz-Salas *et al.*, 2023).

Actualmente, los granos de cerveza se utilizan principalmente como alimento para ganado (Leiva, 2021). Este trabajo de investigación busca transformar los granos gastados de cerveza artesanal (GGCA) en un bioestimulante usando *Lactobacillus rhamnosus*, microorganismo seleccionado por su notoria eficiencia en la producción de bioestimulantes de crecimiento vegetal en comparación de otras especies de bacterias anaerobias, con la finalidad de aplicarse en especies forestales y comerciales, beneficiando el medio ambiente y a PYMES locales del sector cervecero. Investigaciones previas han demostrado el uso de la biotransformación de múltiples residuos para la producción de bioestimulantes y biofertilizantes para mejorar el crecimiento de diversas plantas. Caballero *et al.* (2019) crearon un bioproceso que transforma el suero lácteo en productos valiosos mediante fermentación con *L. rhamnosus*. Estos productos ayudan a las plantas y combaten patógenos del suelo. Bianco *et al.* (2024) estudiaron sustratos de GGC como alternativa a los biofertilizantes minerales para el trasplante de lechuga, comparando diferentes mezclas que mostraron ser efectivas para el crecimiento de hortalizas. Granget *et al.* (2024) produjeron ácido L-láctico a través de la hidrólisis enzimática de GGC, tomando en cuenta varios parámetros para optimizar la producción.

Materiales y Métodos

Muestreo y pretratamiento de los granos gastados de cerveza artesanal

Los GGCA se obtuvieron de la cervecera artesanal “Altas Cervezas Brewing Co.” ubicada en la zona centro del municipio de Orizaba, en el estado de Veracruz. El muestreo de los GGCA se realizó mensualmente recolectando alrededor de 2 kg ya que al ser una planta artesanal opera con bajos lotes de producción. Debido a su alto contenido de humedad, entre el 80 y 90 % (Santacruz-Salas *et al.*, 2023), los GGCA se sometieron a un pretratamiento para facilitar el proceso de fermentación. El pretratamiento consistió en un secado por 24 horas a $105 \pm 2^\circ \text{C}$ para posteriormente ser molido para la reducción de tamaño, tamizarlo con una malla del No.50 y finalmente almacenarlo en bolsas herméticas para su uso. Para realizar la caracterización fisicoquímica y microbiológica de los GGCA se preparó una dilución de 40 g/L con el residuo pretratado.

Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los granos gastados de cerveza artesanal

Las caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas iniciales de los granos gastados de cerveza artesanal (GGCA) establecen valores iniciales de referencia que permiten conocer el comportamiento del *Lactobacillus rhamnosus* durante el proceso de fermentación. Los análisis fisicoquímicos como pH se determinaron mediante el método potenciométrico, sólidos totales (ST) y sólidos totales volátiles (STV) mediante el método 2540 G, Standard Methods, nitrógeno total con el método 4500-NTC C, SM, carbohidratos con Antrona-sulfúrico y proteínas con el método Kjeldahl. Para las determinaciones microbiológicas de hongos, levaduras y bacterias ácido lácticas y aerobias se utilizó el método de conteo de colonias mediante el uso de petrifilm.

Condiciones operativas

El reactor empleado en la fermentación microbiana de los GGCA consistió en un reactor batch que se compone de un cilindro de vidrio de marca Nanshin con un volumen de operación de 1 L, placa de agitación y bomba de recirculación de agua de calentamiento de capacidad de 1.2 L/min (Figura 1). El proceso de biotransformación se operó durante 72 h a 37°C y agitación constante de 120 rpm. Se operó al 5% v/v de inóculo el cual consistió en una mezcla de 45 mL de GGCA y 5 mL de *L. rhamnosus* (matraz semilla). Este matraz semilla se añadió al reactor que contenía 950 mL de GGCA diluidos, como se describió anteriormente.



Figura 1. Esquema del reactor fermentativo

Resultados y Discusión

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica de los GGCA pretratados y se compararon con los resultados presentados por Estrada-García (2024) al mismo residuo. Todas las determinaciones experimentales se realizaron por triplicado.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de los GGCA diluidos.

Parámetros	GGCA	Estrada-García., 2024
Sólidos Totales (%)	3.04 ± 1.66	4.06 ± 0.07
Sólidos Totales Volátiles (%)	2.97 ± 0.04	3.91 ± 0.01
Carbohidratos (g L ⁻¹)	14.89 ± 0.34	14.76 ± 1.24
Proteínas (%)	19.60 ± 1.44	11.29 ± 0.23
Nitrógeno total (%)	3.14 ± 0.23	1.80 ± 0.05
pH	5 ± 0.02	4.9 ± 0.01

El contenido de proteínas presentado por Estrada-García (2024) con un valor de 11.29 % es menor al 19.60 % obtenido en la experimentación. Esta variación puede deberse a factores como el pretratamiento y tratamientos fisicoquímicos a los que son sometidos los GGCA lo que afectan la calidad del contenido proteico como menciona Naibaho *et al.* (2022). Factores externos del proceso de producción de cerveza también afectan las propiedades de los GGCA, tal es el caso de la variación genética de los cultivos de cebada utilizados (Naibaho y Korzenjowska, 2021).

Los resultados de las pruebas microbiológicas de la dilución de los GGCA se muestran la Tabla 2 contando con 3.93 log¹⁰ UFC/g de bacterias aerobias debido a la hidratación de los granos gastados posterior al pretratamiento. Este resultado se comparó con otros autores, el resultado obtenido está por debajo del rango reportado por (Wang *et al.*, 2020) (Dai *et al.*, 2022). Las determinaciones de bacterias ácido lácticas, hongos y levaduras no se reportaron debido a la ausencia de estos durante la caracterización microbiológica.

Tabla 2. Caracterización microbiológica de los GGCA diluidos

Parámetros	GGCA	1	2
Bacterias aerobias	3.93	6.61	4.62

(1) = Wang *et al.*, 2020, (2) = Dai *et al.*, 2022

Al fermento obtenido tras la cinética con el 5 % de inóculo se le evaluó la variación de pH, degradación de carbohidratos, conteo celular y ácido láctico, las determinaciones antes mencionado se realizaron por triplicado. El pH final del fermento fue de 3.51 debido a la producción de ácido láctico por acción del *L. rhamnosus* ya que al ser una bacteria ácido láctica (BAL) heterofermentativa produce una amplia gama de metabolitos tras su fermentación, siendo el ácido

láctico el compuesto orgánico con mayor producción con un 98 % (Narayanan *et al.*, 2007). En la Figura 2 se muestra el comportamiento del crecimiento de las células y la degradación de carbohidratos conforme al paso de los días. Se observa que durante las primeras horas de iniciado el proceso fermentativo el crecimiento celular va aumentando por acción de la presencia de carbohidratos en el medio, alrededor de las 20 horas se observa una disminución en los carbohidratos generando que el crecimiento de las células permanezca constante con un valor aproximado a 8 Log UFC/mL hasta las 60 horas donde el consumo de carbohidratos fue mucho más rápido consumiéndose por completo. Esto demuestra que el inóculo de 5 % permitió un metabolismo bacteriano rápido y una biotransformación eficiente de los GGCA.

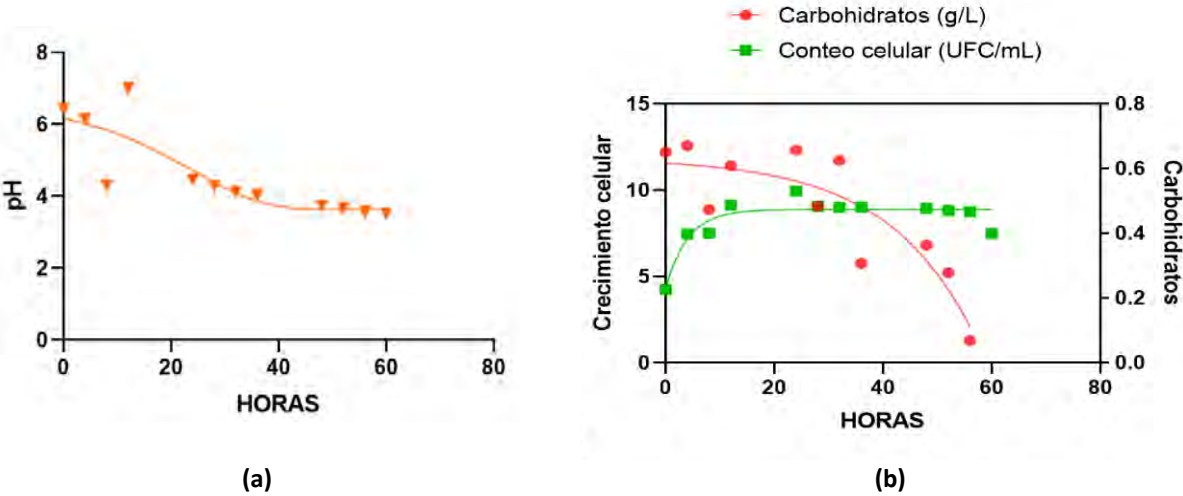


Figura 2. (a) Comportamiento del pH en el proceso de fermentación con *L. rhamnosus*. (b) Cinética de crecimiento y degradación de carbohidratos de *L. rhamnosus*

Para la determinación de ácido láctico se utilizó la técnica descrita en la NOM-420-S-1982 “Productos alimenticios para uso humano-Determinación de acidez en leche fluida”. La técnica descrita en la norma se basa en la titulación alcalimétrica con hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N, utilizando fenolftaleína como indicador.

La Ecuación 1 obtenida de la norma previamente mencionada demuestra el cálculo realizado para determinar la cantidad de ácido láctico obtenido, se contó con 6.75 g/L de ácido láctico en el producto final de la fermentación demostrando el adecuado funcionamiento del *L. rhamnosus* tras la degradación de carbohidratos para la obtención de ácido láctico. Donde V representa el volumen de solución de hidróxido de sodio 0.1 N gastados en la titulación de la muestra en cm³ (15 mL gastados en la determinación de la dilución final), N equivale a 0.1 que es el valor de la normalidad de la solución de hidróxido de sodio, M es el volumen de la muestra en cm³ (20 mL de la muestra total, 1 mL del fermento obtenido disuelto en 19 mL de agua destilada) y el 90 es un equivalente de ácido láctico ya que por 1 cm³ de NaOH equivale a 0.0090 g de ácido láctico.

$$\text{Ácido láctico} = \frac{V * N * 90}{M} \tag{1}$$

En la Tabla 3 se muestran los contenidos de ácido láctico en la dilución de los GGCA antes y después de la fermentación probiótica demostrando que por acción del *Lactobacillus rhamnosus* hubo un aumento en la producción de ácido láctico del residuo de los GGCA.

Tabla 3. Contenido de ácido láctico antes y después del proceso fermentativo

Dilución de GGCA	Generación de ácido láctico (g/L)
Inicial (antes de la fermentación)	-
Final (posterior a la fermentación)	54± 0.5

En base a lo mencionado por Lech (2021) la producción de ácido láctico por la especie de *Lactobacillus rhamnosus* se ve altamente influenciado por la eficiencia celular, ya que al hidrolizar los GGCA, método eficiente para la degradación de lignocelulosa, se generan subproductos que pueden afectar a los microorganismos en el proceso fermentativo como lo son el ácido furfural, acético, fórmico y gálico. Se ha demostrado que el ácido fórmico es perjudicial ya que alrededor de 0.2 g/L de este ácido provoca el envenenamiento de las células disminuyendo su capacidad de producir ácido láctico (Lech, 2021).

Tras el proceso fermentativo se realizó la caracterización fisicoquímica al fermento con *L. rhamnosus* al 5 %, en la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 4. Resultados fisicoquímicos y conteo celular del fermento con *L. rhamnosus*

Parámetros	Fermento (inóculo 5 %)
Sólidos Totales (%)	2.11 ± 0.65
Sólidos Totales Volátiles (%)	1.80 ± 0.11
Nitrógeno total (%)	0.12 ± 0.10
Proteínas (%)	0.75 ± 0.23
pH	3.51 ± 0.15
Conteo celular (Log UFC/ mL)	8

El porcentaje de nitrógeno total es menor al porcentaje de nitrógeno presente en el caldo MRS (0.28 %) que, como menciona Duarte-Manchego *et al.*, (2019), es ampliamente utilizado como referente para conocer el comportamiento de crecimiento de bacterias de los *Lactobacillus* gracias a su rico contenido en compuestos nitrogenados. En base a la literatura, se han reportado alrededor del 0.3 % de nitrógeno total en el medio tras realizar el proceso fermentativo con *Lactobacillus*, sin embargo, debido al bajo contenido reportado de 0.12 % se requiere realizar el proceso fermentativo con porcentajes de inóculo de *L. rhamnosus* mayores al 5 % para determinar si la producción de nitrógeno incrementa o disminuye.

En la Tabla 5 se realiza una comparación entre un bioestimulante comercial y bioestimulante probiótico fermentado con *Lactobacillus rhamnosus* a partir de residuos de Caballero *et al.* (2019).

Tabla 5. Comparación entre bioestimulante comercial y el fermento probiótico con *L. rhamnosus*

	Bioestimulante comercial (AGROSTEMIN-GL)	Bioestimulante probiótico (Caballero <i>et al.</i> 2019)
Sales minerales (%)	0.17	0.024
Potasio (%)	3.6-4	0.128
Calcio (%)	0.03-0.05	0.030
Sodio (%)	-	0.028
Fósforo (%)	0.25-0.75	0.034
Nitrógeno (%)	0.25-0.5	0.916

Debido al alto contenido de potasio, calcio y fósforo con el que contó el fermento de Caballero *et al.* (2019), demostró tener una eficiente aplicación en la nutrición de plantas gracias a su fracción inorgánica, sin embargo, su alto contenido de sales como el cloruro de calcio (NaCl) puede tener afectaciones negativas en la estructura fisicoquímica del suelo al que el bioestimulante sea aplicado.

Es por ello que, para fines de este trabajo el fermento obtenido representa una vía alterna a los bioestimulantes químicos gracias a su contenido de nitrógeno, macronutriente primario benéfico para las plantas para su desarrollo morfológico (raíces, tallos y hojas) y en procesos químicos como la fotosíntesis y la síntesis de clorofila, para ser aplicado en especies comerciales como la cebada y especies forestales como encinos.

Conclusiones

Gracias a la composición de los GGCA, han demostrado ser un residuo con gran potencial de explotación en diversas áreas principalmente como sustrato para procesos fermentativos con bacterias ácido lácticas. Debido a su alto contenido en carbohidratos, lo convierte en una alternativa de sustrato económicamente atractivo el cual al trabajar junto con el *L. rhamnosus*, bacteria ácido láctica heterofermentativa, ha demostrado una producción eficiente de ácido láctico beneficiando al bioestimulante probiótico para su posterior aplicación en especies comerciales y forestales.

Los bioestimulantes a base de fermentación probiótica con bacterias ácido lácticas brindan múltiples beneficios a la salud del suelo y la fertilidad de las plantas, esto se debe a la presencia de macro y micro nutrientes que benefician a un desarrollo eficiente de las plantas. De igual forma, fortalecen el microbiota del suelo disminuyendo el uso de bioestimulantes químicos al igual que ser una alternativa sostenible agrícola favoreciendo la productividad de cultivos y reforestación de una forma respetuosa con el medio ambiente.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece el apoyo económico otorgado por CONACYT a través de la beca con CVU 1340561 y al Instituto Nacional de la Economía Social mediante el Proyecto NODEES Altas Montañas N3024000002.

Bibliografía

- Assandri, D., Pampuro, N., Zara, G., Cavallo, E., y Budroni, M. (2020). Suitability of composting process for the disposal and valorization of brewer's spent grain. *Agriculture*, 11(1), 2. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010002>
- Bianco, A., Melito, S., Garau, M., Giannini, V., Zara, G., Assandri, D., Giacomazza, D., Vargiu, A. V., y Budroni, M. (2024). The potential use of brewers' spent grain-based substrates as horticultural bio-fertilizers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1404914. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1404914>
- Caballero, P., Rodríguez-Morgado, B., Macías, S., Tejada, M., y Parrado, J. (2020). Obtaining plant and soil biostimulants by waste whey fermentation. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 3281–3292. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00660-7>
- Dai, T., Wang, J., Dong, D., Yin, X., Zong, C., y Jia, Y. (2022). Effects of brewers' spent grains on fermentation quality, chemical composition and in vitro digestibility of mixed silage prepared with corn stalk, dried apple pomace and sweet potato vine. *Italian Journal of Animal Science*, 21(1), 198–207. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.2022994>
- Duarte-Manchego, P. A., González-Téllez, J. C., y Muvdi-Nova, C. J. (2019). Evaluación de las proteínas hidrolizadas del lactosuero como fuente de nitrógeno en la fermentación láctica de la lactosa. *Revista Ion*, 32(2), 15–27. <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019002>
- Estrada-García, J., Díaz-González, I., Hernández-Aguilar, E., y Méndez-Contreras, J. M. (2024). Anaerobic biotransformation process of lignocellulosic waste with *Lactobacillus casei* and *Bacillus subtilis* and its effect on physicochemical parameters: Case study of craft brewers' spent grains. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05351-5>
- Granget, C., Manikandan, N. A., Amulya, K., Dabros, M., Fahy, S., Kelleher, S. M., Niemelä, V., Zhang, Z., Murphy, C., y Freeland, B. (2024). Brewer's spent grain as a self-sufficient feedstock for homofermentative production of optically pure L-lactic acid using *Lactobacillus rhamnosus*. *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103582. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103582>
- Lech, M. (2021). The influence of by-products from brewery spent grain hydrolysis on lactic acid fermentation efficiency. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-680313/v1>
- Leiva, C. I., Moreno, N. N., Vitantonio, L., López, D. N., Galante, M., Forastieri, P. S., Pedrido, M. L., Spelzini, D., Giordano, E. D. V., y Boeris, V. (2021). Evaluación de la incorporación de bagazo cervicero en salchichas veganas. <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/12276>
- León, R. I. G. (2022). Aplicación de modelos de economía circular en México y Colombia: Estudio de caso. *Interconectando Saberes*, (14), 203–218. <https://doi.org/10.25009/is.v0i14.2762>
- Naibaho, J., Butula, N., Jonuzi, E., Korzeniowska, M., Laaksonen, O., Föste, M., Rieder, V., Lahtinen, S., y Yang, B. (2022). Potential of brewers' spent grain in yogurt fermentation and evaluation of its impact on rheological behaviour, consistency, microstructural properties and acidity profile during refrigerated storage. *Food Hydrocolloids*, 125, 107412. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107412>
- Naibaho, J., y Korzeniowska, M. (2021). Brewers' spent grain in food systems: Processing and final products quality as a function of fiber modification treatment. *Journal of Food Science*, 86(5), 1532–1551. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15714>
- Narayanan, N., Roychoudhury, P. K., y Srivastava, A. (2004). Isolation of adh mutant of *Lactobacillus rhamnosus* for production of L(+)lactic acid. *Electronic Journal of Biotechnology*, 7(1), 72–84.
- Santacruz-Salas, A. P., Antunes-Pereira, M. L., Gómez-Herrera, S. A., Vélez-Lozano, J. A., y Mancini, S. D. (2023). Sostenibilidad en la industria cervicera: una revisión crítica de los residuos generados y su gestión. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(2), 178–194. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n2.2023.2167>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Análisis de la balanza comercial agroalimentaria de México*. En Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/809009/Balanza_Comercial_Agropecuaria_y_Agroindustrial_enero_2023.pdf
- Vázquez-Alfaro, M., Aguilar-Ávila, J., y Palacios-Rangel, M. I. (2022). Cadena de valor de la industria cervicera en México. *Nova Scientia*, 13(27).
- Wang, S., Zhao, J., Yu, C., Li, J., Tao, X., y Chen, S. (2020). Nutritional evaluation of wet brewers' grains as substitute for common vetch in ensiled total mixed ration. *Italian Journal of Animal Science*, 19(1), 1015–1025. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1810141>

Las mujeres y la gestión de residuos sólidos urbanos en las viviendas: un caso de estudio en la Zona Metropolitana de Oaxaca

Isis Neftaly Martínez Morales ^{1,*}, Iris Margarita Pérez Palacios ²

¹ Pronaii-RSU, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social Unidad Regional Golfo (CIESAS-Golfo), Xalapa, Veracruz, México

² Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación/Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Lerma, Lerma, Estado de México, México

* Autor de correspondencia: isis.martinez@ciesas.edu.mx

Desarrollo Sustentable (Gestión y aprovechamiento de residuos sólidos)

Recibido: 23 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 28 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.629>

Resumen: Los residuos sólidos urbanos (RSU) constituyen un problema creciente derivado del aumento poblacional, los patrones de consumo basados en el uso y descarte, y las soluciones en la disposición final, que han relegado el análisis de las relaciones económicas y sociales dentro de las viviendas. Las cuales son fundamentales para el diseño de programas educativos contextualizados. La Zona Metropolitana de Oaxaca (ZMO) genera alrededor de 1,050 toneladas de residuos diarios aunado a esto, los municipios que la conforman enfrentan la necesidad de fortalecer planes y programas ambientales acordes a sus localidades. Para ello, resulta indispensable comprender el contexto del manejo de los residuos en el ámbito doméstico, en este sentido, el objetivo del presente estudio fue identificar a las personas responsables de la gestión de los residuos en las viviendas de la ZMO. A partir de una muestra de 520 viviendas, seleccionadas conforme a la norma NMX-AA-61-1985 y estratificadas mediante el índice de Nivel Socioeconómico (NSE) de la AMAI, se aplicó el “Cuestionario de Identificación de Viviendas EGyC de RSU”. Los resultados evidencian que, en todos los estratos socioeconómicos, las mujeres asumen más del 50% de las tareas de gestión de residuos, con mayor concentración en los niveles bajos (D+, D y E), donde la responsabilidad femenina alcanza hasta al 85%. En estratos altos (A/B, C+), la participación tiende a distribuirse entre hombres y otros integrantes del hogar, aunque la responsabilidad femenina sigue siendo predominante. El análisis estadístico con prueba de chi-cuadrada reveló una asociación significativa entre el nivel socioeconómico y la persona encargada de gestionar diferentes tipos de residuos ($p < 0.05$). Estos hallazgos evidencian la influencia de los roles de género en la administración de los RSU domiciliarios y destacan la necesidad de políticas públicas y programas de educación ambiental con perspectiva de género.

Palabras clave: residuos sólidos urbanos, gestión doméstica, género

Women responsible for household municipal solid waste management: a case study in the Oaxaca Metropolitan Area

Abstract: Municipal solid waste (MSW) represents a growing challenge resulting from population growth, consumption patterns based on use and disposal, and end-of-life solutions that have relegated the analysis of economic and social relations within households. These relations are essential for the design of context-specific educational programs. The Metropolitan Area of Oaxaca (MAO) generates approximately 1,050 tons of waste per day. In addition, the municipalities that comprise it face the need to strengthen environmental plans and programs adapted to their local realities. To this end, it is indispensable to understand the context of household waste management. In this sense, the objective of the present study was to identify the individuals responsible for waste management within households in the MAO. Based on a sample of 520 households, selected in accordance with the NMX-AA-61-1985 standard and stratified using the AMAI Socioeconomic Level (SEL) Index, the “EGyC MSW Household Identification Questionnaire” was applied. The results show that, across all socioeconomic strata, women assume more than 50% of household waste management tasks, with the highest concentration in the lower levels (D+, D, and E), where female responsibility reaches up to 85%. In higher strata (A/B, C+), responsibilities tend to be more evenly distributed among men and other household members, although women continue to bear the predominant role. Statistical analysis using the chi-square test revealed a significant association between socioeconomic level and the person in charge of managing different types of waste ($p < 0.05$). These findings highlight the influence of gender roles in the administration of household MSW and underscore the need for public policies and environmental education programs with a gender perspective.

Keywords: municipal solid waste, household management, gender

Introducción

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son aquellos que poseen características similares a los que se generan dentro de las viviendas y que surgen como resultado de las actividades diarias y de consumo como el uso de productos de limpieza,

comida, higiene personal y materiales orgánicos (LGPGIR, 2023). En particular, los residuos generados en el ámbito doméstico se denominan como RSU domiciliarios, los cuales han existido desde los inicios de la vida humana en el planeta. En las primeras etapas de la civilización los desechos no eran considerados un problema ambiental o de gestión ya que eran gestionados en comunidad mediante técnicas como la quema para iluminar ciudades o el compostaje (Paniagua, 2022). Sin embargo, durante la Revolución Industrial- etapa en la que se consolidó el modelo de producción basado en el extractivismo y la fabricación masiva de bienes de consumo (Melo Delgado *et al.*, 2022), se modificó el concepto de residuos a lo que conocemos actualmente como *basura*, con una disminución de aprovechamiento, reúso o reciclaje. Actualmente, la gestión de residuos fuera de los hogares es responsabilidad de los gobiernos estatales y municipales; sin embargo, en esta gestión sigue predominando un modelo de economía lineal, lo que ha derivado en aglomeraciones de desechos y proliferación de sitios de disposición inadecuada en barrancas, lagos, ríos, cerros y montañas (Liu *et al.*, 2019). Además, de problemas de salud y sociales con efectos fisiológicos, biológicos, psicosociales y ergonómicos para la población (Fadhullah *et al.*, 2022).

En el caso de México, se estimó para el año 2020, cada habitante generó cerca de 0.653 kg/hab residuos diariamente dentro de sus viviendas (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2020). Considerando un promedio de 4.4 habitantes por vivienda y con 35.3 millones registradas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020) la cantidad producida diariamente se calculó en 101, 423.96 toneladas. Frente a este panorama de generación y hábitos de consumo/descarte bajo el lema “usar y descartar”, diferentes corrientes educativas han propuesto soluciones orientadas a mitigar el riesgo ambiental y de salud, centradas principalmente en el diseño de sitios adecuados de disposición final, optimización en las rutas de recolección, leyes prohibitorias y políticas públicas (Ochoa Chi, 2019). No obstante, las investigaciones centradas en las relaciones económicas y sociales dentro de las viviendas han abordado mayormente la relación de RSU y factores socioeconómicos como el nivel socioeconómico, el gasto para el consumo de productos o la cantidad de alimentos descartados. Pocos estudios han explorado en profundidad la responsabilidad de la gestión de residuos dentro del hogar, y aquellos que lo han hecho muestran estas asignaciones de forma tangencial (Limas Hernández & Blanco Romero, 2017).

Desde una perspectiva de género y asignación de roles impuestos por la sociedad, se ha vinculado a las mujeres y niñas como las principales responsables en la gestión de los residuos en el ámbito doméstico (Mwangi *et al.*, 2021). Esta imposición se acentúa cuando el servicio de recolección no pasa a las viviendas, obligando a las mujeres a buscar una alternativa de disposición, ya mediante el pago a servicios particulares o colocándoles en sitios no autorizados para alejarlos fuera de la casa (Fredericks, 2008).

El estado de Oaxaca, ubicado en el sur de México, se distingue por su riqueza cultural y abundantes recursos naturales. Se divide en ocho regiones: Cañada, Costa, Istmo, Mixteca, Papaloapan, Sierra Sur, Sierra Norte y Valles Centrales, esta última es la de mayor importancia económica del estado sin embargo ha sido una de las áreas más afectadas por el proceso de explosión demográfica. La Región de Valles Centrales comprende siete distritos (Ocotlán, Zimatlán, Zaachila, Etlá, Ejutla, Tlacolula y Centro) que agrupan 121 municipios (COPLADE, 2020). El conjunto de municipios genera aproximadamente 1,050 toneladas de RSU al día, lo que representa el 33% de todo el estado (FONADIN, 2021). Hasta el 2022, el principal sitio de disposición final era el relleno de Zaachila, el cual fue cerrado tras 42 años de operación (Pérez Alfonso, 2022). Pese a que esta región alberga a la capital del estado, sólo el 9.9% de sus municipios cuenta con legislación local en materia de residuos y apenas el 4.1% dispone de un plan de manejo. Asimismo, se ha identificado una necesidad urgente de fortalecer la educación ambiental a nivel municipal (Juárez de la Rosa *et al.*, 2023). Para el diseño de programas educativos ambientales, con el objetivo de buscar las transformaciones de paradigmas y prácticas ambientales es necesario contextualizar el entorno para identificar a las y los actores a quien irá identificado (Miranda Esteban *et al.*, 2024).

Un análisis centrado en la gestión domiciliaria permitirá la comprensión sobre el manejo de los residuos dentro de las viviendas, lo que a su vez facilitaría el diseño de políticas públicas y programas de educación ambiental con un enfoque en la responsabilidad gestión de los residuos dentro de los hogares. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo identificar a las personas responsables de la administración de los residuos dentro de los hogares en la Zona Metropolitana de Oaxaca.

Materiales y Métodos.

Descripción del área de estudio

La Zona Metropolitana de Oaxaca se ubica a 550 km de la Ciudad de México y cuenta con una superficie de 165.946 kilómetros cuadrados y comprende 24 municipios: Ánimas Trujano, Oaxaca de Juárez, San Agustín de las Juntas, San Agustín Yatareni, San Andrés Huayapam, San Antonio de la Cal, San Bartolo Coyotepec, San Jacinto Amilpas, San Lorenzo Cacaotepec, San Pablo Etla, Magdalena Apasco, Nazareno Etla, San Sebastián Tutla, Santa Cruz Amilpas, Santa Cruz Xoxocotlán, Santa Lucía del Camino, Santa María Atzompa, Santa María Coyotepec, Santa María del Tule, Santo Domingo Tomaltepec, Soledad Etla, Tlaxiact de Cabrera, Villa de Etla y Villa de Zaachila, municipios con características similares. Se calcula que el conjunto de los municipios genera aproximadamente 800 toneladas diariamente de RSU (FONADIN, 2021) (Figura 1). Los cuales eran depositados, años atrás, dentro del sitio de disposición de Zaachila, sin embargo, este cerró sus operaciones en el año 2022, debido a que llegó a su capacidad máxima.

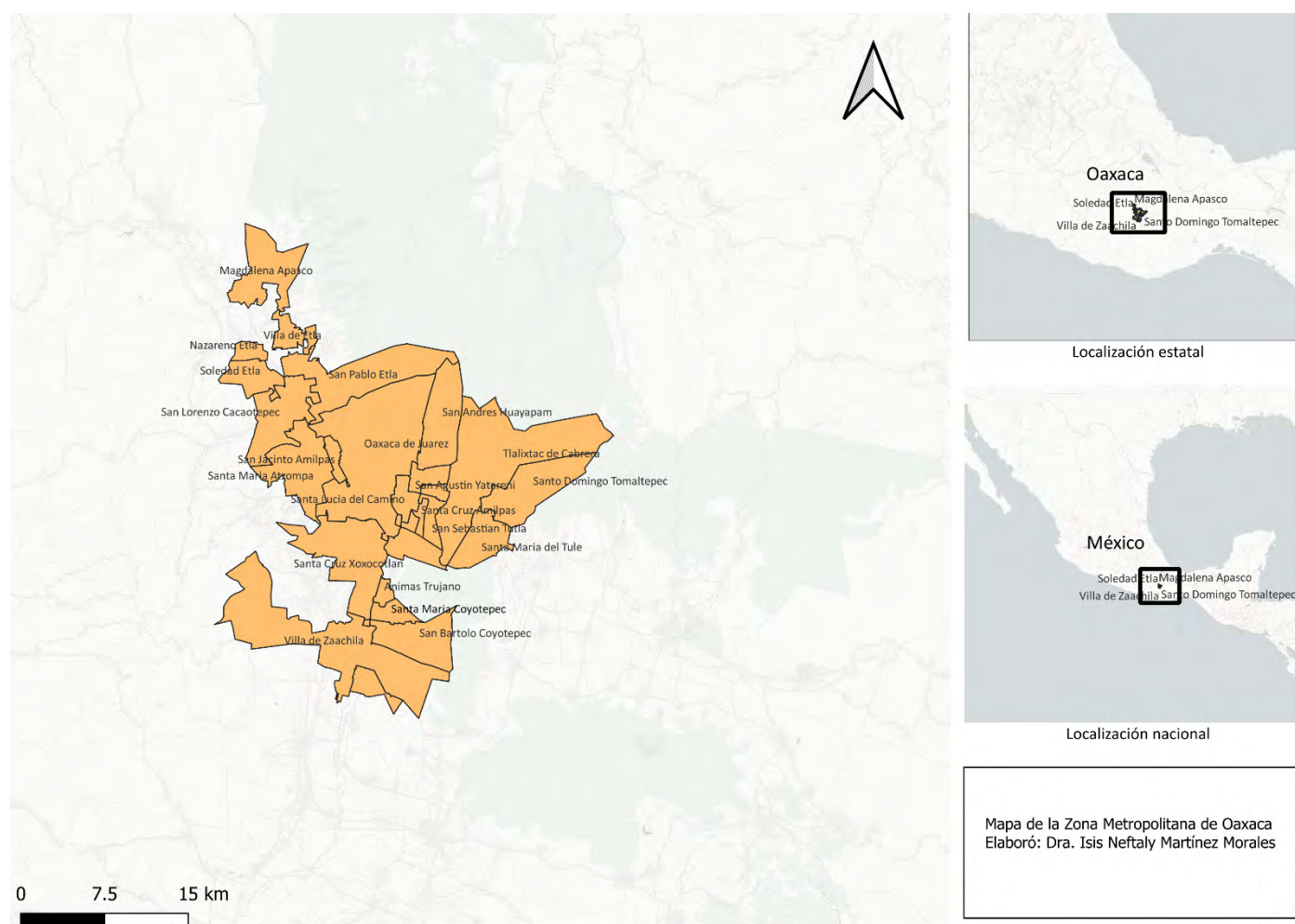


Figura 1. Ubicación y conformación de la zona metropolitana de Oaxaca

Nota: A partir de Asesoría estratégica para la gestión de residuos sólidos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Oaxaca, por el FONADIN, 2021

Selección de la muestra a estudiar

La presente investigación se enmarca en el Estudio de Generación y Caracterización de la Zona Metropolitana de Oaxaca realizado en noviembre del 2023 dentro del Proyecto “Estrategia transdisciplinaria de investigación y resolución en la problemática nacional de los residuos sólidos urbanos, aplicada en seis ciudades mexicanas”, denominado Pronaii-RSU. Para la ejecución del estudio en campo, se tomó como base la norma mexicana NMX-AA-61-1985. “Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales determinación de la generación” (SEMARNAT, 1992),

la cual establece un diseño muestral aleatorio para cada estrato de la población a analizar. La definición de los estratos se realizó a partir de la integración de datos de Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020) y el índice desarrollado por Asociación Mexicana de Agencias de Inteligencia de Mercado y Opinión (AMAI, 2021) denominado Nivel Socio Económico [NSE], el cual agrupa y clasifica el nivel de bienestar del hogar, asociado al nivel de ingreso y estilo de vida; permite hacer una segmentación social y mercadológica para analizar de una manera científica, estandarizada y sencilla, a los grupos que integran la sociedad mexicana.

Los niveles considerados fueron: AB, C+, C, C-, D+, D y E. Siendo el A/B el de mayor nivel socioeconómico y el E el de menor nivel socioeconómico. La aplicación de encuestas se llevó a cabo del 13 y el 16 de noviembre del 2023, con una muestra calculada de 520 viviendas, obteniendo una tasa de respuesta positiva de las 483 viviendas. Las viviendas se localizaron en cinco municipios de la Zona Metropolitana: Oaxaca de Juárez, Santa Cruz Xoxocotlán, Santa Lucía del Camino, San Antonio de la Cal y San Sebastián Tutla. La selección de dichos municipios se fundamentó a partir de un levantamiento en campo, en el cual se consideraron criterios de seguridad, accesibilidad, tiempo de recorrido entre viviendas y de pláticas con las autoridades municipales.

Encuesta en campo

Para la recuperación de datos fue necesario la aplicación de cuestionario denominado “Cuestionario de Identificación de Viviendas EGyC de RSU”, durante un periodo de tres días. Este cuestionario fue aplicado con antelación en tres estudios de generación y caracterización de residuos previos, en las ciudades de Acapulco de Juárez, Cuetzalan del Progreso, Puebla y Ensenada, Baja California. El instrumento comprendió 25 preguntas, divididas en cuatro secciones: hábitos de separación y generación de RSU, Servicios de recolección, Hábitos de consumo y NSE. La sección de hábitos de separación y generación de RSU tuvo como propósito visualizar la forma en que las personas desechan diferentes tipo de residuos y quien es la o el encargado de realizar la actividad (Tabla 1). La respuesta se condicionó a una sola respuesta, indicando a la persona que generalmente realiza la acción.

Tabla 1. Pregunta integrada en el “Cuestionario de Identificación de Viviendas EGyC de RSU”

RESIDUOS QUE DESCARTA	¿QUIÉN ES LA O EL ENCARGADO DE HACER ESTA ACTIVIDAD? (MAMÁ, PAPÁ, HIJA, HIJO, PERSONAL DE LIMPIEZA U OTRA PERSONA)
RESTOS DE FRUTA Y VERDURA	
RESTOS DE COMIDA	
VIDRIO	
LATAS DE ALUMINIO	
LATAS DE HOJALATA	
ROPA Y ZAPATOS	
RESTOS DE JARDINERÍA	

Resultados y Discusión

Gestión de residuos sólidos urbanos domiciliarios

De las respuestas se encontró que, dentro de los siete estratos socioeconómicos muestreados en las nueve preguntas enfocadas en residuos, las mujeres se encargan en más de un 50% de gestionarlos. Para el caso del subproducto de frutas y verduras, para el caso de los niveles socioeconómicos más bajos (D+, D y E) existe una presencia mayoritaria de las mujeres, sobre todo en el estrato D, donde las mujeres están por arriba en un 78.3%. Mientras el nivel es más alto, se percibe un aumento hacia la equidad, en el estrato A/B el 57% que se hace cargo de los residuos son mujeres mientras que en el estrato C, existe una participación de los habitantes de la casa en un 15% (Tabla 2).

Para el caso de los subproductos de restos de comida, existió un cambio para la gestión de los residuos de comida, aunque sigue el patrón de que en los estratos bajos (D+, D y E), sean en su mayoría las mujeres encargadas en los estratos A/B, C+ y C- hubo una disminución para las mujeres y se repartió entre los hombres y todos los integrantes de

la familia. Dentro de las particularidades de los restos de comida es que estos podrían ser usados como alimento para los animales dentro de las viviendas o fuera de las mismas, esto podría explicar la repartición de la gestión para estos estratos (Nath *et al.*, 2023) (Tabla 3).

Tabla 2. ¿Quién se encarga de disponer los residuos de frutas y verduras?

Frutas y verduras					
	Por estrato	Mujeres	Hombres	Todos	No contesto
1	A/B	58.6%	30.5%	8.6%	2.3%
2	C+	69.0%	23.0%	8.0%	0.0%
3	C	68.4%	15.3%	15.3%	1.0%
4	C-	60.3%	27.6%	8.6%	3.4%
5	D+	82.5%	12.5%	5.0%	0.0%
6	D	87.0%	8.7%	2.2%	2.2%
7	E	81.8%	18.2%	0.0%	0.0%

Nota: n = número de encuestas positivas (483); todos = participación compartida

Tabla 3. ¿Quién se encarga de disponer los residuos de restos de comida?

Restos de comida					
	Por estrato	Mujeres	Hombres	Todos	No contesto
1	A/B	57.8%	30.5%	10.2%	1.6%
2	C+	68.0%	21.0%	10.0%	1.0%
3	C	68.4%	17.3%	14.3%	0.0%
4	C-	67.2%	25.9%	6.9%	0.0%
5	D+	82.5%	12.5%	5.0%	0.0%
6	D	91.3%	6.5%	2.2%	0.0%
7	E	81.8%	18.2%	0.0%	0.0%

Nota: n = número de encuestas positivas (483); todos = participación compartida

En el caso de los plásticos hay una modificación para el estrato A/B, C+, C y C-, existe un aumento de la gestión por parte de los hombres y de los participantes de la vivienda. Para los estratos bajos (D+, D), fue lo contrario, se observa un aumento en la participación del 2.5% y en la carga del 9.5% para las mujeres (Tabla 4).

Tabla 4. ¿Quién se encarga de disponer los residuos de restos de plásticos?

Plásticos					
	Por estrato	Mujeres	Hombres	Todos	No contexto
1	A/B	56.3%	32.8%	9.4%	1.6%
2	C+	68.0%	21.0%	10.0%	1.0%
3	C	68.4%	16.3%	15.3%	0.0%
4	C-	63.8%	27.6%	8.6%	0.0%
5	D+	85.0%	10.0%	5.0%	0.0%
6	D	84.8%	13.0%	0.0%	2.2%
7	E	81.8%	18.2%	0.0%	0.0%

Nota: n = número de encuestas positivas (483); todos = participación compartida

A diferencias de los residuos antes mostrados: plásticos, residuos de comida, residuos de fruta y verdura. En los subproductos de vidrio y latas, en todos los estratos apareció la respuesta "No Genera". Sin embargo, la tendencia sobre la gestión de residuos se presentó de manera similar. En los siete estratos las mujeres se hacen responsable del

manejo de los residuos en más de un 50%. Siendo los estratos D+ y D donde se visualiza el menor porcentaje de responsabilidad para el residuo de vidrio por parte de los hombres (Tabla 5).

Tabla 5. ¿Quién se encarga de disponer los residuos de restos vidrio?

		Vidrio				
	Por estrato	Mujeres	Hombres	Todos	No contesto	No genera
1	A/B	56.3%	28.9%	8.6%	0.8%	5.5%
2	C+	66.0%	21.0%	11.0%	0.0%	2.0%
3	C	69.4%	14.3%	13.3%	0.0%	3.1%
4	C-	60.3%	27.6%	8.6%	0.0%	3.4%
5	D+	80.0%	10.0%	7.5%	0.0%	2.5%
6	D	84.8%	13.0%	0.0%	0.0%	2.2%
7	E	72.7%	18.2%	0.0%	0.0%	9.1%

Nota: n = número de encuestas positivas (483); todos = participación compartida; no genera = el subproducto vidrio

Dentro del mercado de los residuos reciclables la lata de aluminio es un residuo con mayor potencial de compra para su posterior reciclaje debido a sus cualidades como su ligereza, maleabilidad, flexibilidad y resistencia a la corrosión (Tizcareño Cortes *et al.*, 2024). En el caso del estrato D se presentó una mayor participación por parte de los hombres para la gestión de este tipo de residuo con un aumento de 2% contra los residuos de vidrio y plásticos y de un 9% contra residuos de comida. Para el estrato C+ se presentó un ligero aumento (2%) en la responsabilidad contra los otros residuos (Tabla 6).

Tabla 6. ¿Quién se encarga de disponer los residuos de restos de lata de aluminio?

		Latas de aluminio				
	Por estrato	Mujeres	Hombres	Todos	No contesto	No genera
1	A/B	53.9%	32.8%	9.4%	0.8%	3.1%
2	C+	64.0%	23.0%	9.0%	0.0%	4.0%
3	C	66.3%	15.3%	15.3%	0.0%	3.1%
4	C-	65.5%	24.1%	6.9%	1.7%	1.7%
5	D+	82.5%	10.0%	7.5%	0.0%	0.0%
6	D	82.6%	15.2%	0.0%	2.2%	0.0%
7	E	72.7%	18.2%	0.0%	0.0%	9.1%

Nota: n = número de encuestas positivas (483); todos = participación compartida; no genera = el subproducto lata de aluminio

La lata de hojalata o “lata chilera” tiene una tendencia de compra parecida a la lata de aluminio, aunque es menor su precio dentro del mercado de reciclables sigue siendo uno de los residuos de mayor demanda dentro de este ámbito. En ese sentido se observa que existió un aumento en la responsabilidad de las latas de hojalata para su disposición en los hombres que integran el grupo C+ en comparación con los residuos como plásticos, residuos orgánicos y residuos de latas (Tabla 7).

En el caso de los residuos de jardinería se presentó el caso para el estrato D parecido a los residuos de comida, donde el porcentaje de responsabilidad de manejo de este subproducto es parecido a los residuos de comida, donde cerca del 90% lo realizan las mujeres. Este hallazgo concuerda con el encontrado en Ozumba (Rojas Contreras *et al.*, 2025)(Rojas Contreras *et al.*, 2025), donde las mujeres presentaron un mayor compromiso hacia prácticas sostenibles y hacia la gestión de residuos orgánicos. Esta respuesta puede ser por la construcción de los roles de género, donde se les ha adjudicado a las mujeres las actividades del cuidado del hogar, incluyendo el aprovechamiento de los recursos a través de diferentes procesos, en el caso de los residuos orgánicos sería el compostaje o como alimento para animales (Casasola, 2021; Solís *et al.*, 2020) (Tabla 8).

Tabla 7. ¿Quién se encarga de disponer los residuos de restos de lata de hojalata?

Latas de hojalata						
	Por estrato	Mujeres	Hombres	Todos	No contesto	No genera
1	A/B	51.6%	32.8%	9.4%	2.3%	3.9%
2	C+	66.0%	21.0%	9.0%	0.0%	4.0%
3	C	65.3%	16.3%	15.3%	0.0%	3.1%
4	C-	65.5%	24.1%	8.6%	0.0%	1.7%
5	D+	82.5%	10.0%	7.5%	0.0%	0.0%
6	D	82.6%	15.2%	0.0%	0.0%	2.2%
7	E	81.8%	18.2%	0.0%	0.0%	0.0%

Nota: n = número de encuestas positivas (483); todos = participación compartida; no genera = el subproducto lata de hojalata

Tabla 8. ¿Quién se encarga de disponer los residuos de restos de jardinería?

Restos de jardinería						
	Por estrato	Mujeres	Hombres	Todos	No contexto	No genera
1	A/B	53.9%	32.0%	8.6%	3.1%	2.3%
2	C+	64.0%	24.0%	8.0%	1.0%	3.0%
3	C	63.3%	16.3%	15.3%	0.0%	5.1%
4	C-	60.3%	25.9%	8.6%	3.4%	1.7%
5	D+	85.0%	10.0%	5.0%	0.0%	0.0%
6	D	89.1%	8.7%	0.0%	2.2%	0.0%
7	E	81.8%	18.2%	0.0%	0.0%	0.0%

Nota: n = número de encuestas positivas (483); todos = participación compartida; no genera = el subproducto jardinería

Relación entre estratos socioeconómicos y los diferentes subproductos

Se observó una diferencia en la participación entre los integrantes de las viviendas según el estrato socioeconómico. Para determinar si existía una relación entre ambos factores, se aplicó la prueba de chi-cuadrada a cada uno de los subproductos analizados, considerando las siguientes hipótesis:

H_0 : El manejo de los desechos de $X_{\text{subproducto}}$ es independiente del estrato.

H_1 : El manejo de los desechos de $X_{\text{subproducto}}$ depende del estrato.

gl = 6 y valor de $p = 0.05$

En todos los casos las $X_{\text{experimental}}$ fueron superiores al valor crítico de la tabla (12.60), lo que llevó a rechazar la hipótesis nula (H_0) para todos los subproductos y confirmar una asociación significativa entre el nivel socioeconómico y la persona encargada del manejo de los residuos. Los resultados se presentan en la siguiente la tabla 9.

Tabla 9. Prueba de chi-cuadrada

Subproducto	$X_{\text{experimental}}$	X_{tablas}	Alpha	Conclusión
Frutas y verduras	17.53	12.60	0.05	Se rechaza H_0
Restos de comida	55.80	12.60	0.05	Se rechaza H_0
Plásticos	18.75	12.60	0.05	Se rechaza H_0
Vidrio	15.84	12.60	0.05	Se rechaza H_0
Latas de aluminio	17.67	12.60	0.05	Se rechaza H_0
Latas de hojalata	18.57	12.60	0.05	Se rechaza H_0
Restos de jardinería	21.18	12.60	0.05	Se rechaza H_0

Nota: gl= 6; valor de $p = 0.05$

Conclusiones

El análisis de la gestión de los residuos sólidos urbanos domiciliarios en la Zona Metropolitana de Oaxaca evidenció que la responsabilidad de estas tareas recae mayoritariamente en las mujeres, especialmente en los estratos socioeconómicos más bajos (D+, D y E), donde la carga de trabajo alcanza porcentajes superiores al 80% en residuos orgánicos y de jardinería. En los estratos medios y altos (A/B, C+ y C), aunque se observa una mayor participación compartida entre integrantes del hogar, la tendencia continúa mostrando una predominancia femenina.

Los resultados de las pruebas de chi-cuadrada confirman que existe una relación significativa entre el nivel socioeconómico y la persona encargada de la disposición de distintos subproductos, lo que demuestra que la variable socioeconómica influye en la asignación de roles domésticos vinculados con la gestión de residuos.

Estos hallazgos reafirman la importancia de integrar la perspectiva de género en las políticas públicas para la creación de soluciones en estratos donde la responsabilidad femenina del manejo de los residuos sea >80%, como el diseño de campañas para una corresponsabilidad doméstica, programas de educación ambiental puntualizados o proyectos de recompensas. Dado que el reconocimiento de la labor femenina en la administración de los residuos constituye un elemento clave para la transición hacia modelos sostenibles de gestión. Asimismo, resalta la necesidad de incorporar la dimensión social en el diseño de estrategias municipales, donde la vivienda y sus dinámicas internas sean consideradas como unidades fundamentales de intervención.

Finalmente, aunque este estudio se limita a la Zona Metropolitana de Oaxaca y a un periodo específico, los resultados aportan evidencia valiosa sobre las prácticas relacionadas con la gestión de los residuos sólidos urbanos en el ámbito doméstico. Reconocer estas interacciones es fundamental para avanzar hacia un manejo integral de los residuos con enfoque social, inclusivo y contextualizado.

Agradecimientos y financiamiento: Este trabajo se realizó bajo el Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia *Estrategia transdisciplinaria de investigación y resolución en la problemática nacional de los residuos sólidos urbanos* (Pronaii-RSU) del Programa Nacional Estratégico Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes (Pronace ATPC). Agradecemos el apoyo brindado por el CONAHCYT (ahora SECIHTI) así como a todas y todos los colaboradores que contribuyeron en esta investigación

Bibliografía

- Asociación Mexicana de Agencias de Inteligencia de Mercado y Opinión (AMAI). (2021). *Nivel Socioeconómico AMAI 2022*. https://amai.org/descargas/Nota_Metodologico_NSE_2022_v5.pdf
- Casasola, A. K. (2021). Manejo de residuos sólidos generados en el mercado central del municipio de Chiquimula. *Revista Naturaleza, Sociedad y Ambiente*, 8(1), 87–101. <https://doi.org/10.37533/cunsurori.v8i1.63>
- COPLADE (Coordinación General del Comité Estatal de Planeación para el Desarrollo de Oaxaca). (2020). *Diagnóstico Plan de Desarrollo Regional Valles Centrales*. <https://www.oaxaca.gob.mx/coplade/wp-content/uploads/sites/29/2021/04/Valles-Centrales.pdf>
- Fadhullah, W., Imran, N. I. N., Ismail, S. N. S., Jaafar, M. H., & Abdullah, H. (2022). Household solid waste management practices and perceptions among residents in the East Coast of Malaysia. *BMC Public Health*, 22(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-12274-7>
- Fredericks, R. (2008). *Gender and the politics of trash in Dakar: Participation, labor and the “undisciplined” woman*. Thinking Gender Papers. <http://escholarship.org/uc/item/5zv4993h>
- Fonadin. (2021). *Asesoría estratégica para la gestión de residuos sólidos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Oaxaca*. <https://www.fonadin.gob.mx/fni2/fe27/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo Poblacional y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Juárez de la Rosa, J. A., Medina Martínez, H., Taboada González, P., Aguilar Virgen, Q., & Márquez Benavides, L. (2023). Gobernanza ambiental en la gestión de residuos sólidos de los municipios en Oaxaca, México. *Acta Universitaria*, 33, 1–19. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3704>
- LGPGIR. (2023). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
- Limas Hernández, M., & Blanco Romero, J. E. (2017). Prácticas de consumo-desecho de residuos sólidos domiciliarios en Ciudad Juárez en 2014. *Iztapalapa. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 83, 97–132. <https://doi.org/10.28928/revistaiztapalapa/832017/atc4/blancoromeroje/liamashernandezm>
- Liu, J., Li, Q., Gu, W., & Wang, C. (2019). El impacto de los patrones de consumo en la generación de residuos sólidos municipales en China: Evidencias de datos provinciales. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(10), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ijerph16101717>
- Melo Delgado, C., Castillo Mutis, G., & García Noguera, L. J. C. (2022). De la economía lineal a la economía circular, transformaciones en el manejo de los residuos sólidos. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 52–82. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2516
- Miranda Esteban, A., Bedolla Solano, R., & Bedolla Solano, I. (2024). Programa de Educación Ambiental No Formal y Sustentable sobre Residuos Sólidos Urbanos (PEANFSRSU) para habitantes de la Comunidad Las Vigas, Gro., México. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 14(28). <https://doi.org/10.23913/ride.v14i28.1905>

- Mwangi, W. W., Kimani, E., & Okong', G. (2021). Domestic solid waste management practices in an informal settlement: A gendered perspective. *International Journal of Research and Scholarly Communication*, 4(2), 26–47.
- Nath, P. C., Ojha, A., Debnath, S., Sharma, M., Nayak, P. K., Sridhar, K., & Inbaraj, B. S. (2023). Valorization of food waste as animal feed: A step towards sustainable food waste management and circular.
- Ochoa Chi, J. (2019). *La crisis de la basura* (Primera ed.). Universidad Autónoma de la Ciudad de México.
- Paniagua, J. M. (2022). *Basura* (A. Cabello Salinas, Ed.; 1ra ed.). Guadalmazán.
- Pérez Alfonso, J. A. (2022). Cierran basurero de Zaachila tras 42 años de funcionamiento. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/10/08/estados/cierran-basurero-de-zaachila-tras-42-anos-de-funcionamiento/>
- Rojas Contreras, I. I., Espinosa-Ayala, E., Márquez Molina, O., & Reyes Reza, I. (2025). Del huerto al basurero: La percepción de los comerciantes de Ozumba sobre el desperdicio alimentario y su impacto ambiental. *Acta Universitaria*, 35. <https://doi.org/10.15174/au.2025.4289>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. www.gob.mx/inecc
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (1992). NMX-AA-61-1985 – *Determinación de la generación, México*. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/mex51942.pdf>
- Solís, M. K., Méndez, J. A., Ramírez, J., Pérez, N., Regalado, J., & Hernández, J. Á. (2020). Prácticas del comercio tradicional en el mercado Cosme del Razo en San Pedro Cholula, Puebla, México. *Revista de El Colegio de San Luis*, 10(21), 1–28. <https://doi.org/10.21696/rcsl102120201191>
- Tizcareño Cortés, K. I., Navarro Segundo, A. L., Téllez García, M. I. de J., & Pineda Almanza, A. (2024). Lata, más que un residuo. La importancia de educar en torno a su recolección y reciclaje. *Verano de la Ciencia XXIX*, 28, 1–9. www.gadisa.es

Co-carbonización hidrotérmica de cascarilla de arroz y digestato para generar agua de proceso con potencial fertilizante

Sandra Janeth Salgado-Serrano, Juan Manuel Méndez-Contreras, Alejandro Alvarado-Lassman y Norma Alejandra Vallejo-Cantú *

División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México.

* Autor de correspondencia: norma.vc@orizaba.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Gestión y aprovechamiento de residuos sólidos)

Recibido: 23 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 28 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.634>

Resumen: La co-carbonización hidrotérmica (co-CHT) de residuos agroindustriales surge como una alternativa sostenible para la gestión y aprovechamiento de residuos. En este estudio se evaluó la transformación de cascarilla de arroz y digestato, proveniente del proceso de digestión anaerobia, en agua de proceso e hidrochar mediante co-CHT a 180 °C, 1 MPa y durante 2 h, utilizando proporciones 1:1 y 1:3. El objetivo principal fue caracterizar el agua de proceso para su posible aplicación como fertilizante líquido. El agua de proceso presentó pH ácido de 3.48 (1:1) y 3.96 (1:3), bajo contenido de sólidos totales 1.64 % (1:1) y 0.92 % (1:3), sólidos volátiles 77.13 % (1:1) y 70.78 % (1:3), cenizas 22.87 % (1:1) y 29.22 % (1:3) y alta carga orgánica total (DQO_T 51.43 g/L en 1:1 y 28.00 g/L en 1:3) y soluble (DQO_S 50.43 g/L en 1:1 y 26.20 g/L en 1:3), así como concentraciones relevantes de macronutrientes (N y P); 21 mg N/L (1:1), 250 mg N/L (1:3), 180 mg P/L (1:1) y 130 mg P/L (1:3). El hidrochar seco mostró los siguientes valores para las proporciones 1:1 y 1:3, respectivamente; un pH ácido (4.55 y 4.68), alto contenido de sólidos totales (94.98 y 96.69 %), bajo contenido de humedad (5.02 y 3.31 %), sólidos volátiles (75.32 y 75.31 %) y cenizas (24.68 y 24.69 %). Los rendimientos obtenidos fueron de 71.55 % (1:1) y 71.59 % de hidrochar (1:3), respecto a la masa de cascarilla, así como 93.23 % (1:1) y 87.25 % de agua de proceso (1:3), respecto a la masa de digestato, destacando que la proporción 1:3 mostró mayor rendimiento de agua de proceso. En general, la co-CHT de cascarilla de arroz y digestato representa una alternativa viable para el aprovechamiento de residuos, generando productos con características prometedoras para su uso agrícola.

Palabras clave: hidrochar, agua de proceso, co-carbonización hidrotérmica, digestión anaerobia, fertilizante orgánico líquido

Co-hydrothermal carbonization of rice husk and digestate to produce process water with fertilizing potential

Abstract: Hydrothermal co-carbonization (co-HTC) of agro-industrial residues emerges as a sustainable alternative for waste management and valorization. In this study, rice husk and digestate derived from anaerobic digestion were transformed into process water and hydrochar through co-HTC at 180 °C, 1 MPa, for 2 h, using mixing ratios of 1:1 and 1:3. The main objective was to characterize the process water for its potential application as a liquid fertilizer. The process water presented an acidic pH of 3.48 (1:1) and 3.96 (1:3), low total solids content of 1.64 % (1:1) and 0.92 % (1:3), volatile solids of 77.13 % (1:1) and 70.78 % (1:3), ash contents of 22.87 % (1:1) and 29.22 % (1:3), as well as high organic load, both total (TCOD: 51.43 g/L at 1:1 and 28.00 g/L at 1:3) and soluble (SCOD: 50.43 g/L at 1:1 and 26.20 g/L at 1:3). Relevant concentrations of macronutrients (N and P) were also found: 21 mg N/L (1:1), 250 mg N/L (1:3), 180 mg P/L (1:1), and 130 mg P/L (1:3). The dry hydrochar showed, for 1:1 and 1:3 respectively, acidic pH values (4.55 and 4.68), high total solids (94.98 and 96.69 %), low moisture content (5.02 and 3.31 %), volatile solids (75.32 and 75.31 %), and ash contents (24.68 and 24.69 %). The obtained yields were 71.55 % (68 g) at 1:1 and 71.59 % (34 g) at 1:3 for hydrochar relative to rice husk mass, as well as 93.23 % (312 g) at 1:1 and 87.25 % (438 g) at 1:3 for process water relative to digestate mass. Biogas generation reached 1020 mL (1:1) and 580 mL (1:3), with the 1:3 ratio showing a higher yield of process water. Overall, co-HTC of rice husk and digestate represents a viable alternative for waste valorization, generating products with promising characteristics for agricultural use.

Keywords: hydrochar, process water, hydrothermal co-carbonization, anaerobic digestion, liquid organic fertilizer

Introducción

En los últimos años, la generación de residuos agrícolas e industriales ha incrementado considerablemente, dichos residuos suelen ser desechados de forma incorrecta representando un grave problema ambiental. Tan solo en México se generan aproximadamente 56 427 toneladas de residuos orgánicos diarios (SEMARNAT, 2020). Generalmente, la cascarilla de arroz, un subproducto generado por la industria arrocería, y el digestato, un residuo líquido resultante del

proceso de digestión anaerobia, son residuos dispuestos de forma inadecuada generando impactos negativos como emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del agua y del suelo (Chen *et al.*, 2025).

De acuerdo con datos de la SIAP (2023) se tuvo una producción de 246 000 toneladas de arroz palay, de los cuales Veracruz produjo 30 766 toneladas, que al mismo tiempo genera una enorme cantidad de cascarilla como residuo. A su vez, dicha producción ha hecho necesario el aumento en la productividad de los cultivos para satisfacer la demanda alimentaria, sin embargo, debido al uso excesivo de fertilizantes químicos, las tierras que son utilizadas para el cultivo están sufriendo pérdida de nutrientes, acidificación y degradación (Wang *et al.*, 2024).

Ante esta problemática, la combinación de residuos como el digestato y la cascarilla de arroz, puede ser aprovechada para enmienda de suelos y fertilizantes orgánicos, mediante el proceso de co-carbonización hidrotérmica (co-CHT), ya que permite el aprovechamiento de biomasa húmeda en condiciones de temperatura y presión adecuadas, sin requerir un secado previo. Como resultado, se obtienen tres fracciones: hidrochar, agua de proceso y biogás.

Si bien el hidrochar ha sido ampliamente estudiado por su potencial como enmienda del suelo, la fase líquida (agua de proceso) ha recibido menor atención. No obstante, diversos estudios han reportado que en esta fase se concentra una fracción considerable de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales son fundamentales para el crecimiento de las plantas, por ejemplo, Mau *et al.* (2016) realizaron la CHT de la cama de aves de corral, examinaron el agua de proceso y encontraron concentraciones relativamente altas de los macronutrientes N, P y K en el líquido (N de 1356 a 2292 mg/L, P de 940 a 2250 mg/L y K de 5870 a 6330 mg/L), sin embargo, los autores señalan que agua de proceso tendría que diluirse para que los nutrientes pudieran estar presentes en concentraciones adecuadas para las plantas.

Huang *et al.* (2022) prepararon fertilizantes con diferentes porcentajes de agua de proceso (de la CHT de estiércol de aves de corral, 220 °C, 1 u 8 h) y urea para suministrar 160 mg kg⁻¹ de N total en un suelo alcalino árido; y los resultados demostraron que la adición de agua de proceso en relación con la urea pura disminuyó la mineralización de N orgánico por baja bioaccesibilidad, aumentó la pérdida de N por alto pH del suelo y disminuyó NO₃⁻-N por sustrato de baja nitrificación, además se potenciaron las bacterias de descomposición, ureólisis y desnitrificación.

Celletti *et al.* (2021) estudiaron la carbonización hidrotérmica de estiércol de vaca caracterizando el agua de proceso resultante en términos de pH, conductividad, C orgánico total, N total, minerales y compuestos orgánicos; en hidroponía con maíz, observaron que una dilución 1:30 del agua de proceso resultó tóxica (por sodio y alcalinidad), mientras que diluciones 1:60 y 1:90 permitieron el desarrollo vegetal adecuada, destacando la importancia de diluir la fase líquida antes de su uso agrícola.

Shan *et al.* (2023) evaluaron el potencial del agua de proceso generada mediante CHT de lodos municipales (a 180 °C y 220 °C) como fertilizante líquido en aplicaciones agrícolas y encontraron que tiene una abundancia relativa de 67 % y 75 % de compuestos que contienen N a 180 °C y 220 °C, respectivamente, además su concentración de metales pesados fue significativamente menor que los límites impuestos por los estándares de aplicación agrícola en varios países.

Tsarpali *et al.* (2021) encontraron que la fase acuosa generada durante la carbonización hidrotérmica de algas extraídas de lípidos contenía altas concentraciones de nitrógeno (2.4 g/L), fósforo (1.75 g/L), carbono orgánico (20.9 g/L) y oligoelementos, además demostraron que puede servir como un medio de cultivo económico que mejora la productividad lipídica de las algas.

Los antecedentes muestran que la composición del agua de proceso depende del tipo de biomasa empleada, en este sentido, la co-CHT de digestato y cascarilla de arroz resulta una alternativa adecuada, ya que ambos residuos son abundantes y con un gran potencial para aportar nutrientes al agua de proceso: el digestato aporta nitrógeno, mientras que la cascarilla de arroz contribuye con compuestos orgánicos. Su combinación mediante co-CHT permite un mejor aprovechamiento de nutrientes y una estrategia sostenible de bajo costo para reducir los impactos ambientales de su disposición inadecuada.

Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue evaluar las propiedades del agua de proceso obtenida a partir de la co-carbonización hidrotérmica de la mezcla de cascarilla de arroz y digestato con el fin de determinar su potencial uso

agrícola como fertilizante orgánico líquido, además de representar una alternativa para disminuir la cantidad de residuos orgánicos, promoviendo la economía circular y el aprovechamiento de residuos.

Materiales y Métodos

Recolección de la materia prima

La cascarilla de arroz utilizada en este estudio (500 g) fue obtenida de una planta procesadora de arroz de la ciudad de Orizaba, Ver. El digestato (2 L) se recolectó de un Reactor de Biopelícula Anaerobio (RBA) del Laboratorio de Ambiental I del Instituto Tecnológico de Orizaba alimentado con residuos sólidos de frutas y verduras (jitomate, lechuga y naranja) obtenidos del mercado municipal “Emiliano Zapata” ubicado en la ciudad de Orizaba, Ver.

Caracterización fisicoquímica de la cascarilla de arroz y digestato

Antes de llevar a cabo el proceso de co-carbonización hidrotérmica se realizó la caracterización de los residuos utilizados para conocer las propiedades iniciales y el comportamiento de la materia prima durante el proceso.

Para el análisis de la cascarilla de arroz se determinaron sólidos totales, contenido de humedad, cenizas y sólidos volátiles siguiendo los métodos establecidos en la Tabla 1, asimismo, se midió el pH de acuerdo con la norma NMX-AA-025-1984 que establece el método potenciométrico para determinar el pH en residuos sólidos.

Por otra parte, al digestato se le realizaron determinaciones que incluyen el pH, demanda química de oxígeno (DQO), y se evaluó el contenido de sólidos totales, sólidos volátiles, humedad y cenizas como se muestra en la Tabla 1, también se le realizó un análisis de macronutrientes para evaluar la concentración de nitrógeno y fósforo.

Todas estas determinaciones se realizaron para conocer la influencia de los residuos en la calidad del agua de proceso resultante.

Co-carbonización hidrotérmica de la mezcla digestato y cascarilla de arroz

Para la obtención del agua de proceso se realizó la co-carbonización hidrotérmica (co-CHT) mediante el uso de un reactor de acero inoxidable tipo batch, (Modelo CF-1, TOPTION INSTRUMENTS, China) con capacidad de 1 L, utilizando las siguientes condiciones de operación; $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{reacción}}=2\text{ h}$ y $P=1\text{ MPa}$, utilizando las proporciones 1:1 y 1:3, operando el reactor al 70 % de su capacidad.

Para la carbonización con la proporción 1:1 se agregó al reactor 95.03 g de cascarilla de arroz triturada (equivalente a 350 mL) con 350 mL de digestato y para la proporción 1:3 se agregó al reactor 47.49 g de cascarilla de arroz triturada (175 mL) con 525 mL de digestato.

Una vez finalizado el proceso y enfriado el sistema, el agua de proceso se recolectó de forma manual directamente del reactor, utilizando un sistema de filtración compuesto por una malla y un embudo de vidrio para remover sólidos suspendidos (hidrochar), el volumen recolectado fue cuantificado mediante el uso de una probeta graduada de 500 mL, posteriormente el agua de proceso se almacenó en recipientes para su posterior caracterización.

Por otra parte, el hidrochar húmedo se separó por filtración y se secó en una estufa(modelo H-33, Riossa) a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas, para su caracterización y almacenamiento. El gas de síntesis únicamente se cuantificó a través de una válvula superior localizada en la tapa del reactor.

Caracterización de las fases de la co-carbonización hidrotérmica

Después del proceso de co-carbonización hidrotérmica y la recolección de las fases (sólida y líquida), se realizó su caracterización. Al agua de proceso se le determinó pH, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales, sólidos volátiles, cenizas, humedad y un análisis que incluye la determinación de macronutrientes como nitrógeno y fósforo y

al hidrochar seco se le determinó pH, sólidos totales, sólidos volátiles, cenizas y humedad. Las Tablas 1 y 2 muestran los métodos utilizados para realizar las caracterizaciones.

Tabla 1. Parámetros físicos evaluados y métodos de prueba

Físicos	Método
pH	Potenciómetro 4500-H ⁺ B Standard Methods
Sólidos Totales (ST)	Gravimétrico
Sólidos Totales Volátiles (SV)	Gravimétrico
Cenizas	Gravimétrico
Humedad	Gravimétrico

Tabla 2. Parámetros químicos evaluados y métodos de prueba

Químicos	Método
DQO Total (DQO _T)	Micrométodo Colorimétrico 5220 D Standard Methods
DQO Soluble (DQO _S)	Micrométodo Colorimétrico 5220 D Standard Methods
Nitrógeno	Nitrógeno total (HI 93767B) Método de ácido cromotrópico
Fósforo	Método colorimétrico (Técnica de Fiske-Subbarow)

Todas las mediciones se realizaron por duplicado y se reporta el valor promedio.

Resultados y Discusión

Caracterización de la cascarilla de arroz y el digestato

Los resultados obtenidos de la caracterización de la materia prima (cascarilla de arroz y digestato) empleada en el proceso experimental se muestran en las Tabla 3 y Tabla 4, respectivamente.

Tabla 3. Caracterización de la cascarilla de arroz

Determinaciones	Resultados
pH	5.78
% ST	89.61
% SV	78.80
% Cenizas	21.19
% Humedad	10.39

Los resultados de la caracterización de la cascarilla de arroz (Tabla 3), muestran valores altos del porcentaje de sólidos totales y bajo contenido de humedad, demostrando que es un residuo con una gran cantidad de materia seca. De igual forma se muestran valores altos de sólidos volátiles, esto se debe a que, de acuerdo con Kordi *et al.*, 2024 la mayor parte de la cascarilla de arroz está constituida por materia orgánica como celulosa (23-25 %), hemicelulosa (18-21 %) y lignina (25-31 %), mientras que el porcentaje de cenizas de 21.19 % indica la fracción inorgánica compuesta principalmente por sílice (18-25 %). Por otra parte, la cascarilla de arroz presentó un pH ácido debido a su composición

lignocelulósica. Estos valores son comparables con los reportados por Arshad y Moin (2025), quienes observaron humedad entre 9.2 - 11.2 %, sólidos volátiles entre 58.8 - 66.4 % y cenizas de 15.9 - 25.6 % en cascarilla de arroz.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica del digestato

Determinaciones	Resultados
pH	6.67
% ST	0.42
% SV	50.22
% Cenizas	49.78
% Humedad	99.58
DQO _T (g/L)	16.95
DQO _S (g/L)	11.29
Nitrógeno (mg N/L)	347.5
Fósforo (mg P/L)	80

En la Tabla 4 se observa que el digestato presentó un pH ligeramente ácido (casi neutro), que es característico de este tipo de residuos provenientes de un proceso de digestión anaerobia. Como se muestra en la Tabla 4, el porcentaje de sólidos totales fue muy bajo debido a que el reactor de biopelícula trata la fracción líquida de los residuos y su configuración evita la salida en exceso de biomasa. Respecto al porcentaje de sólidos volátiles (50.22 %) y el de cenizas (49.78 %) se refieren a los sólidos totales (ST), indicando que aproximadamente la mitad de los sólidos corresponden a materia orgánica y la otra mitad a materia inorgánica (minerales), los resultados de la demanda química de oxígeno mostraron valores elevados, con una DQO_T de 16.95 g/L y una DQO_S de 11.29 g/L, esto indica que se tiene una carga orgánica alta pero menor que la de su materia prima de origen (residuos de frutas y verduras) debido a la acción de los microorganismos durante la degradación. Finalmente, respecto al análisis de macronutrientes se encuentran valores de 347.5 mg N/L y 80 mg P/L. Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con los reportados en la literatura para digestato líquido derivados de la digestión anaerobia de residuos orgánicos, presentan un pH neutro, bajo contenido de sólidos totales debido a su alta proporción de agua, y una elevada demanda química de oxígeno (DQO_T y DQO_S), indicando alta carga orgánica, tal como reportan estudios previos (Camilleri-Rumbau *et al.*, 2021; Nayak y Ranade., 2025; Parra-Orobio *et al.*, 2021). En cuanto a los valores de nitrógeno y fósforo reportados se sitúan en un rango intermedio en comparación con los valores reportados en la literatura, por ejemplo, Krzemińska *et al.* (2019) encontraron concentraciones de nitrógeno total más bajas (115.73 mg/L) y en cuanto a fósforo encontraron 2.08 mg P/L en el digestato líquido proveniente de la fermentación de metano del ensilado de maíz, esto sugiere que la concentración de nutrientes en el digestato puede variar considerablemente dependiendo de la fuente y el proceso de digestión anaerobia utilizado.

Rendimiento obtenido a partir de la co-carbonización

El proceso de la co-carbonización hidrotérmica de la mezcla de digestato y cascarilla de arroz, así como el tratamiento posterior del agua de proceso y el hidrochar se ilustran a continuación en las siguientes figuras.

En la Figura 1, se muestra el proceso de co-carbonización hidrotérmica y los productos obtenidos al finalizar la reacción; sin embargo, el hidrochar y el agua de proceso se encontraban mezclados, por lo que, como se muestra en la Figura 2 se realizó el proceso de separación mediante filtrado, recuperando el agua de proceso en una probeta de 500 mL.

Por otro lado, el hidrochar húmedo recuperado se colocó en una charola de aluminio (Figura 3a) y se secó en la estufa a 105 °C



Figura 1. Co-carbonización hidrotérmica finalizada



Figura 2. Agua de proceso obtenida

durante 2 horas, para obtener el hidrochar seco (Figura 3b) que fue utilizado para la caracterización.

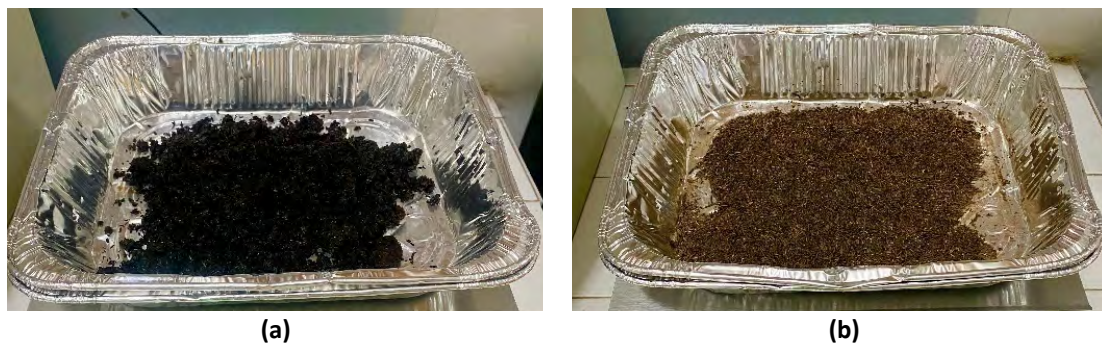


Figura 3. Hidrochar obtenido: (a) Húmedo y (b) seco

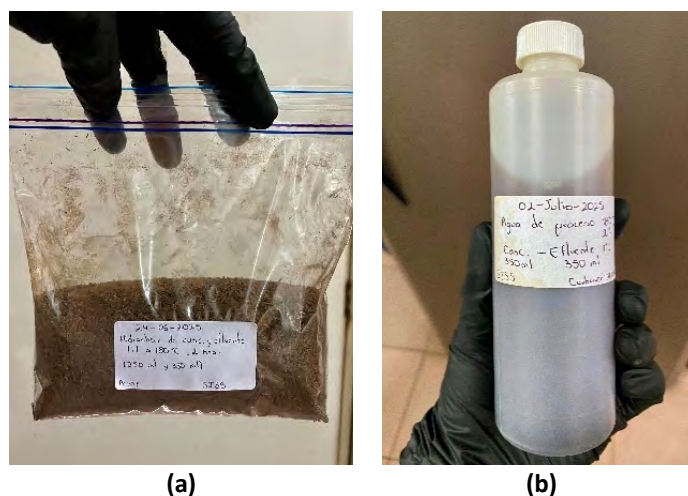


Figura 4. Productos etiquetados para su caracterización y almacenamiento: (a) Hidrochar seco y (b) agua de proceso

Como se muestra en la Figura 4 el hidrochar seco y el agua de proceso se almacenaron adecuadamente en bolsa hermética y botella de plástico, respectivamente, para su almacenamiento y caracterización.

El rendimiento que se genera a partir de las co-carbonizaciones de las proporciones 1:1 y 1:3 de cascarilla de arroz y digestato a 180 °C y 1 MPa, se muestra a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Productos obtenidos de la co-carbonización hidrotérmica de cascarilla de arroz-digestato

Proporción de la co-carbonización	Cantidad de hidrochar seco (g)	Cantidad de agua de proceso (g)	Volumen total de biogás* (mL)
1:1	68	312	1020
1:3	34	438	580

*El biogás no se utilizó en este trabajo, únicamente se cuantificó

En la Tabla 5 se muestra que la co-carbonización hidrotérmica en proporción 1:1 (350 mL de cascarilla de arroz triturada y 350 mL de digestato) produjo una mayor cantidad de hidrochar (68 g), mientras que al incrementar la proporción de digestato 1:3 (175 mL de cascarilla de arroz triturada y 525 mL de digestato) la producción de agua de proceso fue superior (438 g). Esto indica que la cantidad de cada residuo que se introduce al reactor influye directamente en la cantidad de los productos obtenidos: una mayor cantidad añadida de cascarilla de arroz favorece la formación de hidrochar, mientras que una mayor cantidad de digestato incrementa la fracción líquida. En cuanto al biogás, aunque no se utilizó en este estudio, se puede observar que su volumen fue mayor en la proporción 1:1, lo que sugiere que la composición de la mezcla también influye en la generación de gases durante el proceso.

Tabla 6. Rendimiento de la co-carbonización hidrotérmica de cascarilla de arroz-digestato

	Proporción (cascarilla de arroz:digestato)	
	1:1	1:3
Cascarilla de arroz (g húmeda)	95.03	47.49
Digestato (g húmedo)	334.65	501.97
Rendimiento del hidrochar seco (% base cascarilla de arroz)	71.55	71.59
Rendimiento del agua de proceso (% base digestato)	93.23	87.25
Hidrochar (g)	68.00 g	34.00 g
Recuperación hidrochar (% alimentación total)	15.82	6.19
Agua de proceso (g)	312.00	438.00
Recuperación agua (% alimentación total)	72.61	79.71
Biogás contabilizado (g)	49.68	77.49
Biogás (% alimentación total)	11.57	14.10

En la Tabla 6 se presentan los rendimientos y recuperaciones obtenidos en la co-carbonización hidrotérmica de cascarilla de arroz y digestato. A nivel de rendimiento relativo, tanto en la proporción 1:1 como en 1:3 se alcanzaron valores de hidrochar superiores al 71 % respecto a la masa de cascarilla, mientras que los rendimientos de agua de proceso superaron el 87 % respecto a la masa de digestato. Sin embargo, al considerar la alimentación total (cascarilla + digestato), la recuperación de hidrochar correspondió al 15.82 % y 6.20 % para las proporciones 1:1 y 1:3, respectivamente, mientras que la recuperación de agua de proceso alcanzó 72.61 % y 79.71 %. El balance de materia mostró además una fracción contabilizada de 11.57 % en la proporción 1:1 y de 14.10 % en la proporción 1:3, atribuible a la generación de gases (biogás). Cabe destacar que las proporciones 1:1 y 1:3 se expresan en base húmeda. Estos resultados reflejan que la co-carbonización hidrotérmica permite una recuperación eficiente de ambos productos, destacando su potencial como una estrategia sostenible para el aprovechamiento de residuos, además estos rendimientos superiores al 70 % implican una reducción significativa del volumen del residuo original (cascarilla de arroz y digestato), lo que es relevante desde el punto de vista ambiental, ya que facilita su manejo y almacenamiento, representando menores costos de transporte y almacenamiento, y convierte un residuo difícil de gestionar en un producto con valor agregado, como un fertilizante parcial u orgánico. Sin embargo, para que sea considerado un fertilizante orgánico conforme a la normativa mexicana, sería necesario realizar estudios de efectividad biológica que demuestren su impacto positivo en el crecimiento y desarrollo de las plantas, siguiendo los protocolos establecidos en la NOM-077-FITO-2000. Por lo tanto, el término “fertilizante” se emplea aquí solo para indicar el potencial de uso agronómico del producto, sin implicar que cumpla actualmente con los criterios oficiales para su aplicación agrícola.

Caracterización del agua de proceso obtenida

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua de proceso obtenida en ambos ensayos de co-carbonización hidrotérmica (1:1 y 1:3) se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Caracterización del agua de proceso

Carbonización	pH	% ST	% SV	% Cenizas	% Humedad	DQO _T (g/L)	DQO _S (g/L)
1:1	3.48	1.64	77.13	22.87	98.36	51.43	50.43
1:3	3.96	0.92	70.78	29.22	99.08	28.00	26.20

¹ los valores corresponden a promedios de duplicado

En cuanto al agua de proceso obtenida, se observó que el pH presentó valores ácidos en ambas proporciones, siendo ligeramente mayor en la proporción 1:3 (pH=3.96) respecto a 1:1 (pH=3.48) este pH se presentó debido a la formación de ácidos orgánicos en la co-carbonización hidrotérmica, además el aumento del pH en la proporción 1:3 se debe a que hubo una mayor adición de digestato a la mezcla, estos valores son más ácidos que los reportados en estudios previos con lodos y residuos urbanos, donde el pH del agua de proceso suele estar alrededor de 4.5 o superior (Langone y

Basso, 2020). En cuanto al contenido de sólidos totales, se registró una disminución al pasar de 1.64 % en la proporción 1:1 a 0.92 % en la proporción 1:3, mientras que los sólidos volátiles también mostraron una reducción (de 77.13 % a 70.78 %), acompañada de un incremento en el porcentaje de cenizas (de 22.87 % a 29.22 %). Finalmente, la demanda química de oxígeno total (DQO_T) y la disuelta (DQO_S) disminuyeron de manera importante con el incremento de digestato en la mezcla, pasando de 51.43 a 28.00 g/L (DQO_T) y de 50.43 a 26.20 g/L (DQO_S), lo que sugiere una menor carga orgánica en el efluente cuando se trabaja con mayor proporción de digestato. Los valores de DQO_T y DQO_S que se reportan se encuentran en los rangos más altos reportados en estudios similares, pues trabajos como el de Nobre *et al.*, (2021) reportan DQO de hasta 27.2 g/L para residuos similares.

Tabla 8. Análisis de nutrientes del agua de proceso

Carbonización	Nitrógeno (mg N/L)	Fósforo (mg P/L)
1:1	21	180
1:3	250	130

¹ los valores corresponden a promedios de duplicado

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos tras la determinación de macronutrientes (N y P) en ambas carbonizaciones. Se observa que el nitrógeno aumentó de manera significativa al pasar de 21 mg N/L (1:1) a 250 mg N/L (1:3). Por otro lado, el fósforo presentó una disminución de 180 mg P/L en la proporción 1:1 a 130 mg P/L en la proporción 1:3. Esto indica que una mayor proporción de cascarilla favorece la liberación de N al líquido y puede reducir la disponibilidad de P, evidenciando la influencia directa de la relación inicial sobre la distribución de nutrientes tras la co-carbonización hidrotérmica. En comparación con lo reportado por Mau *et al.* (2016), quienes evaluaron el agua de proceso obtenida tras la carbonización hidrotérmica de cama de aves de corral y encontraron concentraciones elevadas de N (1356-2292 mg/L) y P (940-2250 mg/L), los valores obtenidos en este estudio fueron menores. Esta diferencia puede deberse a las materias primas empleadas, ya que la cama de aves de corral presenta un alto contenido de nutrientes debido a las excretas y materia orgánica fácilmente degradable, lo que favorece la liberación de N y P al agua de proceso durante la CHT, por otro lado, la cascarilla de arroz es un residuo lignocelulósico con un menor aporte nutricional, por lo que al combinarse con el digestato se obtienen concentraciones menores en comparación con sustratos de origen animal. Sin embargo, los resultados obtenidos son relevantes desde el punto de vista ambiental, ya que el agua de proceso generada contiene nutrientes en concentraciones más bajas que las reportadas en otros estudios, lo que podría reducir la implicación de procesos de dilución antes de su aplicación en suelos y en plantas. Si bien los resultados de este estudio muestran que el agua de proceso contiene cantidades importantes de nitrógeno y fósforo, para que pueda clasificarse oficialmente como fertilizante orgánico debe demostrarse su eficiencia biológica y el cumplimiento de los límites de contaminantes establecidos en la NOM-077-FITO-2000. En este sentido, el agua de proceso obtenida en este estudio se reconoce como un producto con potencial uso como mejorador de suelo o fertilizante orgánico.

Caracterización del hidrochar obtenido

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del hidrochar seco obtenido en ambos ensayos de co-carbonización hidrotérmica se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Caracterización del hidrochar seco

Carbonización	pH	% ST	% SV	% Cenizas	% Humedad
1:1	4.55	94.98	75.32	24.68	5.02
1:3	4.68	96.69	75.31	24.69	3.31

¹ los valores corresponden a promedios de duplicado

Nota: Los porcentajes de sólidos totales y humedad fueron calculados en base al peso seco del hidrochar, tras el proceso de secado.

La Tabla 9 muestra que el hidrochar presentó un pH ácido en ambas condiciones, con valores ligeramente mayores en la proporción 1:3 (4.68) frente a 1:1 (4.55). El contenido de sólidos totales fue más alto en la proporción 1:3 (96.69 %) en comparación con 1:1 (94.98 %), mientras que los sólidos volátiles y las cenizas se mantuvieron prácticamente constantes (75 % y 24 %, respectivamente) lo que indica que la composición orgánica e inorgánica del hidrochar no se vio significativamente afectada por la proporción inicial. La humedad fue menor en 1:3 (3.31 %) respecto a 1:1 (5.02 %). Los valores obtenidos en este estudio son consistentes con los reportados en la literatura para hidrochar, por ejemplo, un estudio reciente sobre la caracterización de hidrochar derivado de biomasa de madera blanda (Mohan *et al.*, 2025) reportó valores de pH ácido, alto contenido de sólidos totales y sólidos volátiles relativamente constantes.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la co-carbonización hidrotérmica de la mezcla de digestato y cascarilla de arroz es una estrategia eficiente para la valorización de residuos agroindustriales, permitiendo la producción de agua de proceso e hidrochar con altos rendimientos (>87 % para agua de proceso y >70 % para hidrochar), lográndose mejores resultados (mayor cantidad de agua de proceso) en la carbonización 1:3. El agua de proceso generada se caracterizó por un pH ácido, alto contenido de humedad y baja proporción de sólidos totales, lo que confirma que es mayormente líquida. Los valores altos de DQO_T y DQO₅ demuestran que el agua de proceso posee una carga orgánica alta, principalmente en forma soluble (líquida). En cuanto a la determinación de macronutrientes en el agua de proceso, los resultados muestran que la proporción de materias primas en la co-carbonización hidrotérmica influye directamente en la composición final del agua de proceso, mientras que la relación 1:1 favoreció un mayor contenido de fósforo (180 mg P/L), la relación 1:3 incrementa de forma considerable la concentración de nitrógeno (250 mg N/L). Desde una perspectiva agrícola, la relación 1:1 resulta más adecuada en aplicaciones donde se busca un mayor aporte de fósforo, nutriente fundamental en los procesos de floración. Por otro lado, la relación 1:3 representa una alternativa viable si se busca un elevado contenido de nitrógeno, especialmente durante las etapas iniciales de crecimiento vegetativo. En términos generales, dado que el nitrógeno constituye el macronutriente más demandado por la mayoría de los cultivos, la relación 1:3 puede considerarse la opción más favorable para el desarrollo de un fertilizante líquido. Esta variación de nutrientes permite ajustar la cantidad de digestato que se debe ingresar al reactor de carbonización hidrotérmica para obtener el agua de proceso ideal en función del requerimiento de algún cultivo en específico. Además, mostró concentraciones de macronutrientes N y P menores a las reportadas en la literatura para residuos de otro origen, lo que podría facilitar su aplicación agrícola sin requerir diluciones significativas. Por otra parte, el hidrochar resultante presentó características fisicoquímicas similares en ambas carbonizaciones, con un alto contenido de sólidos totales y un pH ácido. Los resultados demuestran que el proceso de co-carbonización hidrotérmica no solo reduce significativamente el volumen de los residuos originales, contribuyendo a la disminución de impactos ambientales asociados con su disposición, sino que también genera productos con valor agregado, confirmando que la valorización de residuos agrícolas e industriales mediante co-carbonización hidrotérmica representa una alternativa sostenible para el manejo y aprovechamiento de residuos.

Es importante resaltar que este estudio no evaluó la toxicidad del agua de proceso ni el contenido de metales pesados, por lo que se recomienda precaución antes de su aplicación agrícola directa y la realización de análisis adicionales para garantizar su seguridad.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado a través de la beca de maestría, el cual hizo posible el desarrollo de este trabajo científico.

Bibliografía

- Arshad, H., & Moin, A. (2025). Physical and chemical properties of rice husk. In *Rice Husk Biomass: Processing, Properties and Applications* (pp. 27–42). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1082-2_2
- Camilleri-Rumbau, M., Briceño, K., Fjerbæk Søtoft, L., Christensen, K., Roda-Serrat, M., Errico, M., & Norddahl, B. (2021). Treatment of manure and digestate liquid fractions using membranes: Opportunities and challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 3107. <https://doi.org/10.3390/ijerph18063107>
- Celletti, S., Lanz, M., Bergamo, A., Benedetti, V., Basso, D., Baratieri, M., Cesco, E., & Mimmo, T. (2021). Evaluating the aqueous phase from hydrothermal carbonization of cow manure digestate as possible fertilizer solution for plant growth. *Frontiers in Plant Science*, 12, 687434. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.687434>

- Chen, H., Sheng, J., Ye, Q., Li, J., Yu, X., Wu, H., Zhang, R., Zhao, S., Zou, X., Li, X., Xue, G., & Yuan, B. (2025). Efficient resource recovery from food waste digestate via hydrothermal treatment and its application as organic fertilizer. *Bioresource Technology*, 416, 131742. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131742>
- Huang, H., Su, Q., Li, J., Niu, Z., Wang, D., Wei, C., Long, S., Ren, J., Wang, J., Shan, B., Li, Y., Liu, Y., Li, Q., & Zhang, Y. (2022). Effects of process water obtained from hydrothermal carbonization of poultry litter on soil microbial community, nitrogen transformation, and plant nitrogen uptake. *Journal of Environmental Management*, 323, 116307. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116307>
- Kordi, M., Farrokhi, N., Pech-Canul, M., & Ahmadikhah, A. (2024). Rice husk at a glance: From agro-industrial to modern applications. *Rice Science*, 31(1), 14–32. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2023.08.005>
- Krzemińska, I., Oleszek, M., & Wiącek, D. (2019). Liquid anaerobic digestate as a source of nutrients for lipid and fatty acid accumulation by *Auxenochlorella protothecoides*. *Molecules*, 24(19), 3582. <https://doi.org/10.3390/molecules24193582>
- Langone, M., & Basso, D. (2020). Process waters from hydrothermal carbonization of sludge: Characteristics and possible valorization pathways. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6618.
- Mau, V., Quance, J., Posmanik, R., & Gross, A. (2016). Phases' characteristics of poultry litter hydrothermal carbonization under a range of process parameters. *Bioresource Technology*, 219, 632–642. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.027>
- Mohan, O., Fakayode, O., & Kumar, A. (2025). Biofuel production from pipeline-transported lignocellulosic biomass via hydrothermal liquefaction: Process optimization and product characterization. *Biomass and Bioenergy*, 202, 108210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108339>
- Nayak, J., & Ranade, V. (2025). Valorisation of digestate: Characteristics, products, processes and potential. *Chemical Engineering Journal Advances*, 100887. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100887>
- Nobre, C., Alves, O., Durão, L., Şen, A., Vilarinho, C., & Gonçalves, M. (2021). Characterization of hydrochar and process water from the hydrothermal carbonization of refuse-derived fuel. *Waste Management*, 120, 303–313. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.040>
- Parra-Orobio, B., Rotavisky-Sinisterra, M., Pérez-Vidal, A., Marmolejo-Rebellón, L., & Torres-Lozada, P. (2021). Physicochemical and microbiological characterization and phytotoxicity of digestates produced on single-stage and two-stage anaerobic digestion of food waste. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00085-9>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos 2020*. México. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/presenta-semarnat-el-diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-residuos-2020>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. México. https://www.fec-chiapas.com.mx/sistema/biblioteca_digital/escenario-julio-productos-agroalimentarios-huevo-para-plato.pdf
- Shan, G., Li, W., Bao, S., Liu, J., Zhu, L., & Tan, W. (2023). Evaluating the aqueous phase obtained from hydrothermal carbonization of municipal sludge as possible liquid fertilizer for plant growth: An analysis of heavy metals and their molecular composition. *Journal of Cleaner Production*, 404, 136989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136989>
- Tsarpali, M., Arora, N., Kuhn, J., & Philippidis, G. (2021). Beneficial use of the aqueous phase generated during hydrothermal carbonization of algae as nutrient source for algae cultivation. *Algal Research*, 60, 102485. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102485>
- Wang, J., Xia, R., Xu, C., Yang, X., Li, Y., Li, Q., Zhang, T., Chen, Q., Zhou, H., & Zhang, Y. (2024). Characteristics of industrialized hydrothermal cracking solid organic fertilizer and its effects on fresh corn growth. *Waste Management*, 177, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.02.005>

Avances en el modelado y simulación de procesos de biometanización aplicados a las aguas residuales de la industria láctea

Alan-Jair Gamboa-Escobar ¹, Carlos-Manuel Astorga-Zaragoza ^{1,*}, Yurika Toledo-Sánchez ¹, Oswaldo Guzmán-López ², Tomás-Eduardo Rodríguez-Ramírez ²

¹ Departamento de Ciencias de la Ingeniería, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México

² Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: carlos.az@cenidet.tecnm.mx

Bioinformática aplicada a las Energías Renovables (Modelado y simulación de bioprocesos)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 28 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.605>

Resumen: La industria láctea genera efluentes con alta carga orgánica, lo que representa un desafío ambiental y una oportunidad para la generación de energía renovable mediante digestión anaerobia. La biometanización convierte estos residuos en biogás, contribuyendo a la reducción de contaminantes y al aprovechamiento energético. En los últimos años, el desarrollo de modelos matemáticos y herramientas de simulación ha permitido comprender mejor la dinámica del proceso y optimizar su operación. Este artículo revisa los avances en el modelado y simulación de la biometanización aplicada a aguas residuales de la industria láctea, con énfasis en el modelo de digestión anaerobia ADM1, sus variantes simplificadas, y el uso de plataformas como MATLAB/Simulink y GPS-X, ampliamente empleadas en el modelado dinámico y de plantas de tratamiento, respectivamente; DWSIM y SuperPro Designer, útiles para integrar balances de energía y análisis económico; COMSOL Multiphysics, orientada a la simulación multifísica de transporte de masa y calor; y WEST, AQUASIM, BioWin y OpenModelica, que permiten desde la calibración de parámetros hasta la integración con sistemas energéticos. Se discuten los retos en la integración de datos experimentales, la calibración de parámetros y la implementación de estrategias de control. Finalmente, se identifican tendencias futuras en la digitalización de procesos, gemelos digitales y control predictivo, orientadas hacia la sostenibilidad energética y ambiental.

Palabras clave: biometanización, aguas residuales lácteas, modelado y simulación, ADM1, energías renovables

Advances in modeling and simulation of biomethanization processes applied to wastewater from the dairy industry

Abstract: The dairy industry generates effluents with a high organic load, which represents an environmental challenge and an opportunity for renewable energy generation through anaerobic digestion. Biomethanization converts this waste into biogas, contributing to the reduction of pollutants and energy use. In recent years, the development of mathematical models and simulation tools has allowed for a better understanding of the dynamics of the process and optimization of its operation. This article reviews advances in the modeling and simulation of biomethanization applied to wastewater from the dairy industry, with an emphasis on the ADM1 anaerobic digestion model, its simplified variants, and the use of platforms such as MATLAB/Simulink and GPS-X, widely used in dynamic modeling and treatment plant modeling, respectively; DWSIM and SuperPro Designer, useful for integrating energy balances and economic analysis; COMSOL Multiphysics, geared toward multiphysics simulation of mass and heat transport; and WEST, AQUASIM, BioWin, and OpenModelica, which enable everything from parameter calibration to integration with energy systems. The challenges of integrating experimental data, calibrating parameters, and implementing control strategies are discussed. Finally, future trends in process digitization, digital twins, and predictive control, geared toward energy and environmental sustainability, are identified.

Keywords: biomethanization, dairy wastewater, modeling and simulation, ADM1, renewable energies

Introducción

La industria láctea es una de las principales generadoras de aguas residuales con alta carga de materia orgánica, grasas y nutrientes. Estos efluentes, si no son tratados adecuadamente, representan un impacto ambiental considerable debido a su elevada demanda química y biológica de oxígeno (DQO y DBO), que puede provocar eutrofización y deterioro de cuerpos de agua (Demirel *et al.*, 2005).

La digestión anaerobia ha surgido como una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, al permitir la estabilización de la materia orgánica y la producción de biogás rico en metano (CH₄), el cual puede

aprovecharse como fuente energética. En este contexto, la biometanización aplicada a efluentes lácteos se ha consolidado como un proceso de doble beneficio: mitigación de contaminación y valorización energética (Batstone *et al.*, 2002).

La necesidad de diseñar, dimensionar y optimizar sistemas de biometanización ha impulsado el desarrollo de modelos matemáticos y simulaciones computacionales. Estas herramientas permiten representar la cinética de degradación de sustratos complejos, analizar el comportamiento de microorganismos en condiciones específicas y predecir la producción de biogás en distintos escenarios. El modelo ADM1 (Anaerobic Digestion Model No.1), desarrollado por la IWA, se ha convertido en el referente estándar para la simulación de digestión anaerobia (Batstone *et al.*, 2002).

Además, este tipo de iniciativas están alineadas con la Agenda 2030 para los Objetivos de Desarrollo Sostenible, impulsada por la ONU, especialmente en lo que respecta al ODS 6: Agua limpia y saneamiento, al tratar efluentes con alta carga orgánica y prevenir la contaminación de cuerpos de agua; al ODS 7: Energía asequible y no contaminante, mediante la valorización energética de los residuos a través de la producción de biogás renovable; y al ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, al fomentar el uso de tecnologías de modelado, simulación y control en procesos biotecnológicos avanzados; y con el ODS 13: Acción por el clima, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero gracias al aprovechamiento del metano generado. De esta manera, la biometanización no solo resuelve un problema ambiental, sino que también fortalece la transición hacia sistemas productivos más sostenibles (FAO, 2023). Asimismo, inserta en una economía circular, donde residuos lácteos y otros residuos alimentarios se convierten en biogás mediante digestión anaerobia, promoviendo el uso eficiente de recursos y contribuyendo a los ODS" (Ferdes *et al.*, 2022).

El objetivo de este artículo es revisar los avances recientes en el modelado y simulación de procesos de biometanización aplicados a aguas residuales de la industria láctea, identificando tendencias, retos y oportunidades de mejora en la gestión de este proceso biotecnológico.

Materiales y Métodos

La digestión anaerobia es un proceso biológico que convierte la materia orgánica presente en residuos agroindustriales en biogás, principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este proceso ocurre en ausencia de oxígeno y es llevado a cabo por consorcios microbianos que actúan en cuatro fases metabólicas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis mostradas a continuación en la Figura 1 (Batstone *et al.*, 2002).

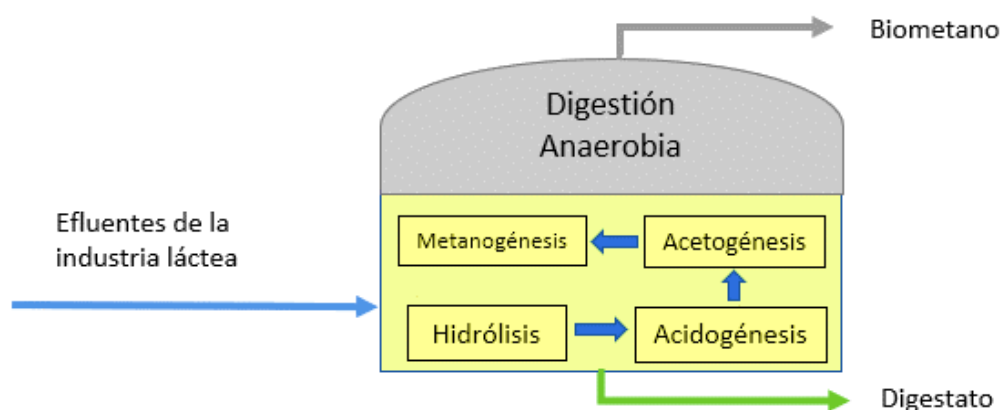


Figura 1. Esquema de la digestión anaerobia de efluentes de la industria láctea con producción de biometano y digestato

En el caso de la industria láctea, los efluentes se caracterizan por contener altas concentraciones de grasas, proteínas y lactosa, lo que genera una elevada carga orgánica expresada en DQO y DBO como se muestra en la Tabla 1. El lactosuero, por su alto contenido de lactosa, proteínas y grasas, presenta un gran potencial para la producción de biogás; sin embargo, su elevada carga orgánica requiere un control cuidadoso de la operación del biorreactor para evitar inhibiciones. Estos parámetros hacen que su vertimiento sin tratamiento represente un serio problema

ambiental, ya que provocan eutrofización y disminución de oxígeno en cuerpos de agua (Demirel *et al.*, 2005). La digestión anaerobia en biorreactores ofrece una solución eficaz, pues permite estabilizar la materia orgánica y, al mismo tiempo, generar biogás como fuente energética renovable (Rajesh Banu *et al.*, 2020).

Tabla 1. Propiedades características del lactosuero proveniente de la industria láctea

Propiedad	Rango característico	Unidad
pH	4.5 – 6.0	-
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	50,000 – 80,000	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO)	40,000 – 60,000	mg/L
Lactosa	35 - 50	g/L
Proteínas	6 - 10	g/L
Grasas	2 - 5	g/L

Los biorreactores anaerobios han sido diseñados en múltiples configuraciones para optimizar la producción de biogás. Entre los más destacados se encuentran los reactores de mezcla completa (CSTR), los reactores de flujo ascendente con manto de lodos (UASB) y los de lecho fijo o fluidizado. Los CSTR son adecuados para efluentes con alta heterogeneidad, como los lácteos, debido a la homogeneidad que ofrece su mezcla, mientras que los UASB destacan por su alta eficiencia de remoción con bajos tiempos de retención hidráulica como se muestra en la Figura 2 (Demirel & Yenigün, 2017; Rico *et al.*, 2015b).

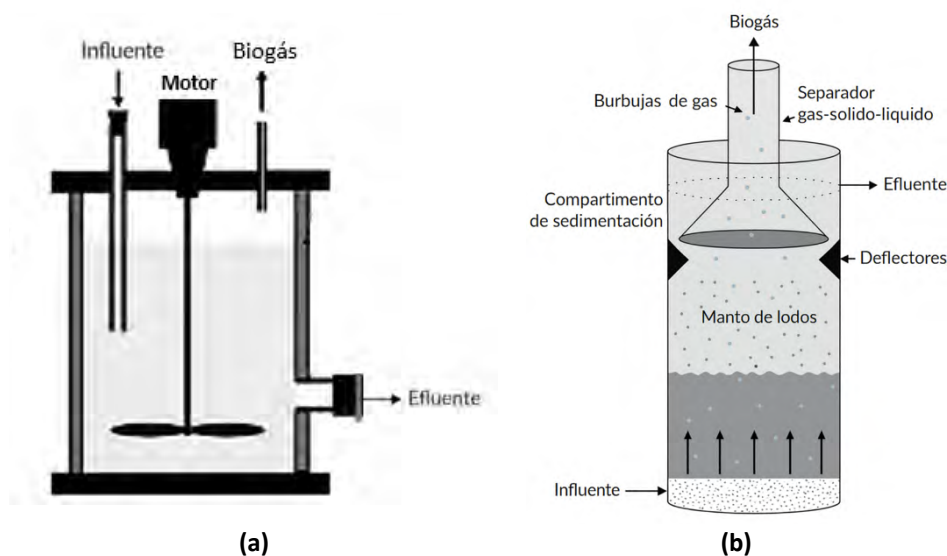


Figura 2. Esquemas de biorreactores anaerobios empleados en el tratamiento de efluentes lácteos: (a) Reactor de mezcla completa (CSTR) y (b) Reactor de flujo ascendente con manto de lodos (UASB)

Diversos estudios han evaluado el desempeño de la digestión anaerobia aplicada a efluentes lácteos. Por ejemplo, Rico *et al.* (2015)b demostraron que la co-digestión de lactosuero con estiércol bovino en reactores UASB mejora la estabilidad del proceso y aumenta el rendimiento de metano. Asimismo, (Aboudi *et al.*, 2015) observaron que la co-digestión de subproductos lácteos con estiércol, bajo tiempos de retención hidráulica adecuados, permite alcanzar mayores eficiencias de remoción de materia orgánica. Resultados similares se han reportado en estudios de optimización que integran residuos lácteos con otros desechos agroindustriales, logrando incrementos en la producción de biogás (Matheri *et al.*, 2017).

En cuanto a los valores de producción, la digestión anaerobia de efluentes lácteos permite obtener rendimientos de 0.3–0.5 m³ CH₄/kg DQO removido, dependiendo de la carga orgánica aplicada y el tipo de reactor (Angelidaki *et al.*, 2018). La Tabla 2 resume los valores característicos reportados para lactosuero y otros efluentes agroindustriales, con base en estudios recientes (Demirel & Yenigün, 2017; Rico *et al.*, 2015b; Feng *et al.*, 2020; Kalyuzhnyi *et al.*, 2000; Mata-

Alvarez *et al.*, 2014; Matheri *et al.*, 2017). Además, configuraciones de dos etapas han mostrado potencial para diversificar productos: la primera etapa destinada a la producción de hidrógeno y la segunda a la generación de metano, aumentando la eficiencia energética del proceso (Kalyuzhnyi *et al.*, 2000).

Tabla 2. Propiedades características del lactosuero proveniente de la industria láctea y otros efluentes agroindustriales

Sustrato / Efluente	Rango de DQO (mg/L)	Rendimiento de CH ₄ (m ³ /kg DQO)	Referencia
Lactosuero (queserías)	50,000 – 80,000	0.30 – 0.40	Demirel & Yenigün (2017)
Lactosuero + estiércol (cogestión UASB)	40,000 – 70,000	0.35 – 0.45	Rico <i>et al.</i> (2015)b
Aguas residuales lácteas (plantas piloto)	30,000 – 60,000	0.30 – 0.50	Feng <i>et al.</i> (2020)
Residuos lácteos (queso + suero)	45,000 – 85,000	0.32 – 0.48	Kalyuzhnyi <i>et al.</i> (2000)
Residuos efluentes cárnicos	60,000 – 100,000	0.35 – 0.35	Mata-Alvarez <i>et al.</i> (2014)
Residuos efluentes cerveceros	20,000 – 40,000	0.35 – 0.50	Matheri <i>et al.</i> (2017)
Vinazas (destilerías caña/tequila/etanol)	50,000 – 150,000	0.20 – 0.35	Aboudi <i>et al.</i> (2015)
Efluentes azucareros / melazas	80,000 – 120,000	0.25 – 0.40	Mata-Alvarez <i>et al.</i> (2014)

Finalmente, el uso de modelos matemáticos y simulaciones computacionales ha ganado relevancia en la optimización del proceso. El modelo ADM1 de la IWA sigue siendo el estándar de referencia para describir la digestión anaerobia, y su aplicación a residuos lácteos requiere ajustes específicos en los parámetros cinéticos debido a la complejidad del sustrato (Batstone *et al.*, 2002). Actualmente, la integración de herramientas como MATLAB/Simulink, GPS-X, COMSOL y DWSIM permite realizar simulaciones dinámicas, calibrar parámetros y evaluar estrategias de control en escenarios operativos diversos (Feng *et al.*, 2020; Zambrano *et al.*, 2019).

Modelo ADM1

El Modelo de Digestión Anaerobia No. 1 (ADM1) desarrollado por la IWA constituye el estándar internacional para la simulación de procesos de digestión anaerobia en aguas residuales y residuos sólidos. Este modelo integra en una formulación estructurada las principales rutas bioquímicas: hidrólisis de carbohidratos, proteínas y lípidos; acidogénesis; acetogénesis; y metanogénesis, considerando además fenómenos de inhibición, balances de masa y transferencia gas-líquido (Batstone *et al.*, 2002). Gracias a su flexibilidad, el ADM1 permite adaptar influentes con distinta composición orgánica, como es el caso de los efluentes lácteos, caracterizados por su alta carga de lactosa, proteínas y grasas. La Tabla 3 resume la asignación de los principales componentes físico-químicos a los estados de ADM1, así como los valores finales utilizados como condiciones de entrada al modelo.

Tabla 3. Asignación de los principales componentes físico-químicos a los estados de ADM1 proveniente de la industria láctea con las siguientes características: lactosa 40 g/L, proteínas 8 g/L, grasas 3.5 g/L.

Componente físico-químico	Estado ADM1	Asignación sugerida	Valor (g DQO/L)
Lactosa (azúcares)	Ssu (azúcares solubles)	90% soluble	38.5 (≈ 0.9×42.8)
Lactosa particulada (si aplica)	Xch (carbohidratos particulados)	10%	4.3
Proteínas solubles (AA)	Saa (aminoácidos)	30%	3.4 (≈ 0.3×11.36)
Proteínas particuladas	Xpr (proteínas particuladas)	70%	7.9
Grasas solubles (AGCL)	Sfa (ácidos grasos de cadena larga)	40%	4.0 (≈ 0.4×10.05)
Grasas particuladas	Xli (lípidos particulados)	60%	6.0
Inertes particulados	Xi	Si no hay dato experimental	0–2 (opcional)
Inertes solubles	Si	Si no hay dato experimental	0–1 (opcional)

Para implementar el ADM1 en el contexto de aguas residuales lácteas, fue necesario realizar la caracterización del influente y su posterior asignación a las fracciones de materia orgánica definidas en el modelo (Batstone *et al.*, 2002). Los parámetros experimentales obtenidos (lactosa, proteínas y grasas) se expresaron en unidades de demanda química de oxígeno (DQO) y fueron distribuidos en sus respectivas fracciones solubles y particuladas, según las

recomendaciones de la literatura para matrices complejas con alto contenido de carbohidratos y lípidos (Rico *et al.*, 2015a; Zaher *et al.*, 2009).

En las últimas dos décadas, el Modelo de Digestión Anaerobia No. 1 (ADM1) propuesto por la IWA (Batstone *et al.*, 2002) se ha consolidado como el marco de referencia más utilizado para el análisis y simulación de procesos de biometanización. No obstante, debido a la complejidad inherente de su estructura (26 estados y 19 procesos bioquímicos), diversos autores han planteado modificaciones y extensiones orientadas a mejorar su aplicabilidad práctica en distintos escenarios. Entre estos avances destacan las versiones reducidas que simplifican el número de estados para facilitar el control en línea (Zaher *et al.*, 2009), así como su adaptación a nuevos sustratos agroindustriales como lactosuero, vinazas y residuos lignocelulósicos (Rico *et al.*, 2015a; Aboudi *et al.*, 2015). Adicionalmente, se han incorporado nuevas funciones de inhibición para representar los efectos de compuestos como H_2S y ácidos grasos de cadena larga (Demirel & Yenigün, 2017; Angelidaki *et al.*, 2018), y se ha extendido el modelo con balances energéticos y térmicos para predecir la temperatura del reactor y optimizar la integración con sistemas de cogeneración (Pérez-Elvira *et al.*, 2019).

De igual manera, el ADM1 se ha utilizado como plataforma de validación para estrategias avanzadas de control (MPC, lógica difusa, redes neuronales), lo que fortalece su papel como herramienta de ingeniería de procesos más allá de la investigación básica (Astorga-Zaragoza *et al.*, 2008). Por otro lado, su integración en entornos de simulación como Matlab/Simulink, Python y GPS-X, junto con técnicas de calibración automática de parámetros, ha permitido una mayor transferencia tecnológica hacia la operación industrial (Feng *et al.*, 2020). En la Tabla 4 se sintetizan estos avances, los cuales evidencian la evolución del ADM1 desde un modelo estandarizado hacia un marco flexible y adaptable, capaz de abordar la diversidad de matrices residuales y las demandas actuales de eficiencia energética, sostenibilidad y economía circular en la digestión anaerobia.

Tabla 4. Avances en el modelo ADM1 reportados en la literatura

Categoría de avance	Descripción	Referencias
Simplificación de estados	Reducción del número de variables y procesos (ej. eliminación de VFA menores, agrupación de fracciones) para facilitar simulaciones rápidas y control en línea.	Zaher <i>et al.</i> , 2009; Rosen & Jeppsson, 2006
Aplicación a nuevos sustratos	Adaptación del ADM1 para efluentes lácteos (lactosa, proteínas, grasas), vinazas, residuos lignocelulósicos y co-digestión agroindustrial.	Rico <i>et al.</i> , 2015a; Kalyuzhnyi <i>et al.</i> , 2000; Aboudi <i>et al.</i> , 2015
Nuevas inhibiciones	Inclusión de efectos de H_2S , ácidos grasos de cadena larga (AGCL) y toxicidad metálica, además de pH, H_2 y NH_3 libre del modelo original.	Batstone <i>et al.</i> , 2002; Demirel & Yenigün, 2017; Angelidaki <i>et al.</i> , 2018
Balances energéticos y térmicos	Acoplamiento del ADM1 con balances de energía para predecir temperatura del reactor y optimizar cogeneración/trigeneración.	Pérez-Elvira <i>et al.</i> , 2019; Batstone & Vavilin, 2014
Integración con control avanzado	Uso de ADM1 como banco de pruebas para control P, PI, PID, MPC, lógica difusa y redes neuronales en plantas de biogás.	Zaher <i>et al.</i> , 2009; Astorga-Zaragoza <i>et al.</i> , 2008
Co-digestión	Extensiones del ADM1 para modelar la mezcla de diferentes residuos y evaluar sinergias o inhibiciones en biometanización.	Rico <i>et al.</i> , 2015b; Matheri <i>et al.</i> , 2017
Implementaciones computacionales	Desarrollo de versiones en Matlab/Simulink, Python, GPS-X, DWSIM, AQUASIM, con calibración automática mediante algoritmos evolutivos.	Batstone <i>et al.</i> , 2002; Feng <i>et al.</i> , 2020; Aboudi <i>et al.</i> , 2015

Softwares de simulación

En el ámbito del modelado y la simulación de la digestión anaerobia, el Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) se ha consolidado como el marco de referencia más utilizado a nivel internacional. No obstante, su implementación práctica

depende en gran medida de los softwares de simulación disponibles, los cuales varían en complejidad, accesibilidad y alcance. Cada plataforma ofrece ventajas específicas para la representación de procesos bioquímicos, la calibración de parámetros y la optimización de los digestores anaerobios empleados en la industria láctea.

En la última década, diversos softwares de simulación se han consolidado como herramientas esenciales para el estudio y optimización de procesos de digestión anaerobia en la industria láctea. Entre los más destacados se encuentran MATLAB/Simulink y GPS-X, ampliamente empleados en el modelado dinámico y en la simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales, respectivamente. Por su parte, DWSIM y SuperPro Designer permiten integrar balances de energía y materia, además de evaluar la factibilidad económica del proceso, lo que resulta particularmente útil en escenarios de escalamiento industrial.

Asimismo, COMSOL Multiphysics ofrece un enfoque más avanzado orientado a la simulación multifísica, permitiendo representar fenómenos de transporte de masa, calor y reacciones bioquímicas de manera acoplada. En el ámbito especializado de tratamiento de aguas, programas como WEST, AQUASIM y BioWin han demostrado gran utilidad en la calibración de modelos biológicos y en la optimización operativa de reactores. Finalmente, plataformas de código abierto como OpenModelica están ganando terreno, al permitir la implementación de modelos personalizados y su integración con sistemas de control y optimización en tiempo real. En la Tabla 5 se resumen las principales características de estos softwares, destacando sus aplicaciones, fortalezas y limitaciones para el modelado y simulación de la digestión anaerobia aplicada a aguas residuales de la industria láctea.

La comparación de diferentes softwares aplicados a la digestión anaerobia y estimación de producción de metano donde se destacan sus ventajas, limitaciones y capacidad de estimar la producción de metano. Esta información evidencia la diversidad de herramientas disponibles y la importancia de seleccionar la plataforma adecuada en función del objetivo de investigación o aplicación industrial.

Implementación de biometanización.

Casos concretos de plantas de tratamiento de efluentes lácteos reportados en la literatura.

1. Planta UASB en India (Kalyuzhnyi *et al.*, 2000)

- Se trató lactosuero con DQO de 50,000–70,000 mg/L.
- El sistema alcanzó remociones de DQO del 85–90% y una producción de metano cercana a 0.33 m³ CH₄/kg DQO eliminado.
- Reto: la sobrecarga de lactosa generaba acidificación, requiriendo control estricto del tiempo de retención hidráulico (TRH).

2. Planta de digestión anaerobia en España (Rico *et al.*, 2015b)

- Se evaluó la co-digestión de lactosuero con fracción líquida de estiércol vacuno.
- Producción de biogás: 0.35–0.40 m³ CH₄/kg DQO, mejorando la estabilidad frente a cargas elevadas de azúcares.
- Reto: necesidad de balance de nutrientes (C/N) para evitar inhibición por amonio.

3. Planta piloto en Dinamarca (Demirel & Yenigün, 2017)

- Digestión de suero lácteo en CSTR mesofílico.
- Se obtuvieron reducciones de 70–80% de DQO y biogás con 65% de CH₄.
- Reto: el contenido graso del efluente provocó inhibiciones por ácidos grasos de cadena larga (AGCL), lo que obliga a aplicar estrategias de pretratamiento (homogeneización, separación de grasas).

Tabla 5. Comparación de softwares de simulación aplicados a la digestión anaerobia y estimación de producción de metano

Software	Aplicación principal	Ventajas	Limitaciones	¿Permite estimar producción de metano?
MATLAB/Simulink	Modelado dinámico de procesos, control y simulación en tiempo real	Flexibilidad para implementar modelos como ADM1, integración con controladores	Requiere programación avanzada y licencias de pago	Sí, mediante ecuaciones del ADM1 y balances de carbono
GPS-X	Simulación de plantas de tratamiento de aguas residuales	Incluye biblioteca ADM1, interfaz amigable, calibración integrada	Software comercial, alto costo	Sí, calcula CH ₄ y CO ₂ como productos de la digestión
DWSIM	Simulación de procesos químicos con balances de materia y energía	Código abierto, integración de termodinámica	Limitado en cinéticas biológicas, requiere personalización	Posible, pero requiere implementar modelo cinético adicional
SuperPro Designer	Evaluación económica y balances de procesos biotecnológicos	Integra balances de proceso + análisis económico, útil en escalado	Limitado en detalle cinético, requiere integración externa	Parcial: puede estimar metano a partir de rendimientos globales
COMSOL Multiphysics	Simulación multifísica: transferencia de calor, masa y fluidos	Modelado CFD avanzado, transporte acoplado de sustratos	Requiere hardware potente, curva de aprendizaje alta	Sí, si se integra cinética ADM1 o parámetros bioquímicos
WEST	Modelado de procesos de tratamiento de aguas	Soporta ADM1, calibración de parámetros	Software comercial	Sí, incluye producción de metano en el balance
AQUASIM	Modelado y calibración de procesos biológicos en aguas	Permite simulación dinámica y calibración detallada	Visualización gráfica limitada	Sí, calcula producción de metano a nivel experimental y de laboratorio
BioWin	Simulación de plantas de tratamiento y digestión anaerobia	Interfaz gráfica intuitiva, validación industrial	Menos personalizable que MATLAB o GPS-X	Sí, con resultados directos de producción de biogás/metano
OpenModelica	Simulación dinámica basada en lenguaje Modelica	Código abierto, flexible y multiplataforma	Menos documentación para digestión anaerobia	Sí, pero requiere programación avanzada de modelos cinéticos

Resultados y Discusión

Los resultados reportados en plantas de tratamiento de efluentes lácteos muestran que la biometanización es una alternativa viable para la reducción de carga orgánica y la generación de energía renovable. En sistemas UASB aplicados a lactosuero con altas cargas orgánicas se han alcanzado remociones de DQO superiores al 85% y producciones de metano del orden de 0.30–0.35 m³ CH₄/kg DQO eliminado (Kalyuzhnyi *et al.*, 2000). Asimismo, la co-digestión con estiércol ha demostrado mejorar la estabilidad del proceso, incrementando la producción de biogás hasta 0.40 m³ CH₄/kg DQO y reduciendo problemas de acidificación (Rico *et al.*, 2015b). Sin embargo, se han identificado limitaciones relacionadas con la acumulación de ácidos grasos de cadena larga y el desbalance nutricional, lo que resalta la necesidad de estrategias de pretratamiento y control de parámetros operativos (Demirel & Yenigün, 2017). Estos ejemplos evidencian tanto el potencial energético como los retos técnicos asociados a la biometanización de efluentes lácteos, aspectos que deben considerarse en la implementación industrial y en el diseño de modelos como el ADM1.

La revisión de los modelos y herramientas de simulación aplicadas a la digestión anaerobia de efluentes lácteos evidencia que, si bien el ADM1 constituye el estándar de referencia, aún persisten retos en su implementación a nivel

industrial debido a la necesidad de calibración intensiva de parámetros y a la variabilidad inherente en la composición de los residuos lácteos. Los softwares analizados (MATLAB/Simulink, GPS-X, DWSIM, COMSOL, entre otros) permiten abordar distintas dimensiones del proceso: desde la dinámica bioquímica hasta la integración energética y económica.

Oportunidades de mejora y tendencias

En cuanto a las oportunidades de mejora, se identifican varias líneas críticas que pueden potenciar el desempeño del proceso de biometanización:

Integración de inteligencia artificial (IA): algoritmos de machine learning y control predictivo avanzado ofrecen la posibilidad de mejorar la predicción de la producción de biogás y la detección temprana de fallas.

Digitalización y gemelos digitales: la incorporación de plataformas de modelado dinámico en tiempo real podría permitir la creación de gemelos digitales de plantas de biometanización, optimizando la operación y facilitando la toma de decisiones.

Optimización multiobjetivo: los futuros modelos deberán considerar simultáneamente la eficiencia energética, la viabilidad económica y la reducción de emisiones, integrando análisis de ciclo de vida (LCA).

Calibración automática de parámetros: el uso de técnicas de optimización y metamodelos híbridos (físico-datos) facilitará la adaptación del ADM1 y sus variantes a diferentes matrices de efluentes lácteos.

Integración con economía circular: la digestión anaerobia de residuos lácteos no solo debe enfocarse en biogás, sino también en la recuperación de nutrientes (N, P) y en la valorización de digestato como biofertilizante.

En términos de tendencias, se proyecta que la próxima década estará marcada por la automatización de plantas de biogás, la adopción de sistemas híbridos físico-datos, y la transición hacia un enfoque de bio-refinerías lácteas, donde los residuos se transformen en múltiples productos de valor (biometano, biofertilizantes, agua tratada). Estas innovaciones, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, consolidarán la biometanización como un pilar clave en la transición energética y en la sostenibilidad de las industrias lácteas y agroalimentarias.

Conclusiones

La digestión anaerobia de efluentes de la industria láctea representa una alternativa tecnológica con doble beneficio: la mitigación de impactos ambientales asociados a la elevada carga orgánica de estos residuos y la producción de biogás como fuente renovable de energía. El análisis realizado evidencia que el modelo ADM1 constituye la herramienta de referencia para describir la compleja interacción bioquímica del proceso, permitiendo predecir la producción de metano y evaluar escenarios de operación. Sin embargo, su aplicación práctica requiere ajustes específicos en la calibración de parámetros y adaptación a las características particulares de los efluentes lácteos.

Asimismo, los softwares de simulación revisados ofrecen un amplio espectro de posibilidades, desde el modelado dinámico (MATLAB/Simulink, GPS-X) hasta la integración de balances de energía y análisis económico (DWSIM, SuperPro Designer), lo que abre la puerta a evaluaciones más holísticas del proceso. A pesar de estos avances, persisten limitaciones en la validación a escala industrial y en la implementación de estrategias de control avanzadas.

De cara al futuro, la convergencia de la digitalización, los gemelos digitales y la inteligencia artificial marcará una tendencia clave en la optimización de sistemas de biometanización, consolidando su papel dentro de la economía circular y la transición energética. En este sentido, los biorreactores anaerobios aplicados a la industria láctea no solo deberán ser concebidos como unidades de tratamiento, sino como componentes estratégicos de bio-refinerías que permitan maximizar el aprovechamiento energético y la valorización de subproductos.

En conclusión, la integración de modelos matemáticos, plataformas de simulación y tecnologías emergentes constituye el camino hacia procesos de biometanización más eficientes, resilientes y sostenibles, capaces de responder a los desafíos ambientales y energéticos contemporáneos.

Agradecimientos y financiamiento: Alan Gamboa agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por apoyar sus estudios de maestría en ciencias de la ingeniería. Los autores también agradecen al Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza, del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, y al Dr. Oswaldo Guzmán López, de la Universidad Veracruzana, por su orientación, cuya supervisión fue esencial para el desarrollo de esta investigación.

Bibliografía

- Aboudi, K., Álvarez-Gallego, C. J., & Romero-García, L. I. (2015). Semi-continuous anaerobic co-digestion of sugar beet byproducts and cow manure: Effect of hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, 190, 17–23. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.038>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452–466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Astorga-Zaragoza, C. M., González-Álvarez, V., Reyes-Reyes, J., & Puebla, H. (2008). Observer-based monitoring of heat exchangers: Application to fault detection. *Chemical Engineering Science*, 63(24), 6076–6086. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.09.009>
- Batstone, D. J., & Virdis, B. (2014). The role of anaerobic digestion in the emerging energy economy. *Current Opinion in Biotechnology*, 27, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.01.013>
- Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 45(10), 65–73. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>
- Bernard, O., & Chachuat, B. (2015). Mathematical modeling of anaerobic digestion. En C. Batt & M. Tortorello (Eds.), *Encyclopedia of Food Microbiology* (pp. 156–164). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00214-4>
- Björnsson, L., Murto, M., & Mattiasson, B. (2001). Evaluation of parameters for monitoring an anaerobic co-digestion process. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 54(6), 844–849. <https://doi.org/10.1007/s002530100694>
- Demirel, B., & Yenigün, O. (2017). Anaerobic digestion of dairy wastewaters: A review. *Process Biochemistry*, 51(12), 1528–1541. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.07.020>
- Demirel, B., Yenigün, O., & Onay, T. T. (2005). Anaerobic treatment of dairy wastewater: A review. *Process Biochemistry*, 40(8), 2583–2595. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.12.015>
- Donoso-Bravo, A., Mailier, J., Martin, C., Rodríguez, J., Aceves-Lara, C. A., & Wouwer, A. V. (2011). Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: A review. *Water Research*, 45(17), 5347–5364. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.059>
- FAO. (2023). *The State of Food and Agriculture 2023 – Revealing the true cost of food to transform agrifood systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cc7724en>
- Feng, L., Luo, J., & Chen, Y. (2020). Anaerobic digestion of dairy wastewater for methane production: Current status and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110287>
- Ferdeş, M., Zabavă, B. S., Paraschiv, G., Ionescu, M., Dincă, M. N., & Moiceanu, G. (2022). Food waste management for biogas production in the context of sustainable development. *Energies*, 15(17), 6268. <https://doi.org/10.3390/en15176268>
- Kalyuzhnyi, S., Veeken, A., & Hamelers, B. (2000). Two-stage anaerobic digestion of cheese whey: Hydrogen production and methanogenesis. *Water Science and Technology*, 41(3), 141–148. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0065>
- Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.039>
- Matheri, A. N., Belaid, M., & Muzenda, E. (2017). Optimization of biogas production from anaerobic co-digestion of wastewater sludge and food waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.029>
- Pérez-Elvira, S. I., Fdz-Polanco, M., & Garrido, J. M. (2019). Energy and thermal integration of anaerobic digestion: A review of strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109332>
- Rajesh Banu, J., Kavitha, S., Yukesh Kannah, R., & Yogalakshmi, K. N. (2020). Anaerobic digestion of dairy wastewater for energy recovery: Recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology*, 302, 122829. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122829>
- Rico, C., García, H., & Rico, J. L. (2015)a. Physical-anaerobic treatment of dairy manure with high content of solids: Evaluation by the ADM1 model. *Waste Management*, 43, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.027>
- Rico, C., Muñoz, N., Fernández, J., & Rico, J. L. (2015)b. High-load anaerobic co-digestion of cheese whey and liquid fraction of dairy manure in a one-stage UASB process: Limits in co-substrate ratio and organic loading rate. *Science of the Total Environment*, 505, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.098>
- Rosen, C., & Jeppsson, U. (2006). *Aspects on ADM1 implementation within the BSM2 framework*. Lund University.
- Vavilin, V. A., Fernandez, B., Palatsi, J., & Flotats, X. (2008). Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*, 28(6), 939–951. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.028>
- Zaher, U., Buffiere, P., Steyer, J. P., & Chen, S. (2009). Application of the ADM1 model to simulate anaerobic digestion of a full-scale municipal solid waste digester. *Environmental Technology*, 30(9), 959–971. <https://doi.org/10.1080/09593330902948004>
- Zambrano, J., Pino, N., & Torres, L. (2019). Simulation of anaerobic digestion processes using MATLAB/Simulink. *Environmental Technology*, 40(10), 1283–1294. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1418917>

Disminución de la temperatura de sellado en películas de polietileno modificadas con acrílicos, ahorro de energía

Ana Beatriz Morales Cepeda ^{1,*}, Claudia Esmeralda Ramos-Galvan ², Anjuli Hernández Martínez ¹

¹ Centro de Investigación en Petroquímica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Altamira, México

² Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Altamira, México

* Autor de correspondencia: ana.mc@cdmadero.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Optimización de procesos energéticos)

Recibido: 28 de septiembre de 2025

Aceptado: 15 de octubre de 2025

Publicado: 28 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.647>

Resumen: El ahorro de energía en los procesos industriales es fundamental para disminuir costos en los productos finales, así como hacer un proceso más sustentable. Se estudió la disminución de la temperatura de selle en películas de polietileno modificadas con monómeros acrílicos. Esta modificación en la superficie de la película por medio de una polimerización con luz ultravioleta fue evaluada por espectroscopia de infrarrojo, pruebas de sellado con diferentes temperaturas y fuerzas, así como la fuerza de tracción de las muestras. La presencia del poli(ácido acrílico) fue corroborada con la técnica de espectroscopia de infrarrojo, así como la temperatura de sellado disminuyó de 110°C a 83 °C, lo que coloca en un ahorro de energía calculado de 110 kVA/hora. La fuerza de tracción de la película está dentro del parámetro de un polímero comercial de 43 Kg_f.

Palabras clave: temperatura de sellado, polietileno, acrilatos, ahorro de energía

Decrease in sealing temperature in polyethylene films modified with acrylics, energy savings

Abstract: Energy savings in industrial processes are fundamental to reducing costs in final products and making the process more sustainable. The reduction in sealing temperature of polyethylene films modified with acrylic monomers was studied. This modification of the film surface by ultraviolet light polymerization was evaluated by infrared spectroscopy, sealing tests at different temperatures and forces, and tensile strength measurements of the samples. The presence of poly (acrylic acid) was confirmed by infrared spectroscopy, and the sealing temperature decreased from 110 °C to 83 °C, resulting in a calculated energy saving of 110 kVA/hour. The tensile strength of the film is within the range of a commercial polymer at 43 kg_f.

Keywords: sealing temperature, polyethylene, acrylates, energy savings

Introducción

La conservación de alimentos, así como la mejora continua en los tipos de envasado, ha sido muy importante a través del tiempo, ya que no solo involucra la calidad del empaque, sino también el ahorro de materias primas, energía y, sobre todo, una imagen atractiva para el consumidor. Un factor que influye en el desarrollo de la industria del embalaje es el uso final del material, teniendo como prioridades proteger el producto, identificarlo, que sea posible imprimir dibujos y textos para el etiquetado para obtener un empaque sencillo de abrir pero que al mismo tiempo el producto esté protegido dentro del empaque contra los efectos del ambiente.

Los envases flexibles de multicapa son la combinación de dos o más capas dentro de una red compuesta o de tubo. Sea cual sea la aplicación o el uso, los materiales poliméricos son seleccionados para que la estructura del empaque reúna ciertos requisitos de desempeño para cierta aplicación en particular. Dentro de las propiedades que deben cumplir estas capas está la temperatura de sellado; esta temperatura es a la cual se debe fundir o activar la capa de sellador, para permitir que los materiales se adhieran adecuadamente (Saechtling, 2006). De acuerdo con lo anterior, tenemos que el mejoramiento de las propiedades de adhesión del polietileno se realiza empleando diversos métodos como lo es extrusión, copolimerización en fase gaseosa y con luz ultravioleta. Esta investigación presenta resultados de la modificación de la superficie del polietileno con diferentes monómeros, mediante el uso de luz ultravioleta. Esta investigación pretende reducir el consumo de energía, y la contaminación por los procesos exhaustivos de polimerización de poliolefinas, en especial los polímeros de alto consumo como lo es el polietileno. El objetivo de esta

investigación es disminuir la temperatura de selle mediante la copolimerización de monómeros acrilatos en la superficie del polietileno.

Materiales y Métodos

El polietileno que se utilizó en las síntesis fue de Ziploc® Sandwich bags, que está compuesto de polietileno lineal de baja densidad combinado con polietileno de baja densidad. Los reactivos empleados como monómeros son de la marca Sigma Aldrich. Metacrilato de 3 – (trimetoxisilil) – propilo (TMSPM), Ácido acrílico anhidro (ac acr) y Trietoxivinil silano (TVS), en todos ellos se eliminó el inhibidor. Los iniciadores utilizados fueron de marca Sigma Aldrich; peróxido de benzoilo, y la benzofenona. Tolueno (ACS)/ JT Baker, Acetona (ACS)/ Analitika, se utilizaron como solventes. Para la reacción de modificación de la superficie se utilizó una lámpara ultravioleta del tipo Minera light lamp, modelo R – 52G (115 V) marca UVP para fotoquímica, de onda corta $\lambda = 254\text{nm}$.

Copolimerizaciones: Se realizaron en solución en relación 2:1 monómero: solvente con 2 % en peso del iniciador, se dejan agitando durante 5 minutos. Posteriormente se agrega la solución preparada a las películas de polietileno, de manera que el líquido cubra la superficie de las películas capa por capa. La copolimerización inicia cuando se enciende la lámpara UV durante 30 minutos. Las películas modificadas se lavan con agua destilada, finalmente se dejan secando a 30°C por 24 horas.

Espectroscopia de infrarrojo: Se usó un espectrofotómetro de infrarrojo por transformada de Fourier marca Perkin Elmer, modelo Spectrum One, con una escala de 4000 – 600 cm^{-1} , empleando 12 barridos y una celda de Reflectancia total atenuada (ATR) marca Pike. La muestra fue en película, del grosor entre 20 a 30 μm .

Temperatura de sellado: Para el sellado de películas se empleó una selladora de pedal marca Hillas Packing con un dinamómetro, con control de temperatura. El rango de temperatura usado para el sellado fue entre 60 a 130° C para controlar la temperatura de sellado mínima (Hernández Martínez A.,2012). La fuerza del sellado es de 25 – 20 kg_f . En la Figura 1 se muestra el diagrama de la metodología.

Fuerza de tracción: La fuerza de tracción se usó una máquina universal Shimadzu AG5-20 KNG, de acuerdo con la norma ASTM 6238



Figura 1. Diagrama de metodología

Resultados y Discusión

En la Figura 2 se presenta el espectro infrarrojo correspondiente al polietileno sin modificar, así como al material modificado con ácido acrílico, tolueno y peróxido de benzoilo. El espectro de polietileno sin modificar presenta bandas características de tensión del grupo CH_2 a 2850 – 2960 cm^{-1} , de flexión del CH_2 a 1465 cm^{-1} y un balanceo de CH_2 a 725 – 750 cm^{-1} debido a la cadena larga de más de 4 grupos CH_2 . Mientras el polietileno modificado con ácido acrílico línea azul, muestra además de las bandas anteriormente descritas para el polietileno puro, las bandas características del poli (ácido acrílico) en la superficie que son estiramientos $\text{C} = \text{O}$ a 1750 – 1800 cm^{-1} , también presenta las bandas de los grupos $-\text{OH}$ a δ 1200 – 1250 cm^{-1} y del grupo $-\text{CH}_2$ unido a un grupo $-\text{OH}$ a 1000 – 1075 cm^{-1} .

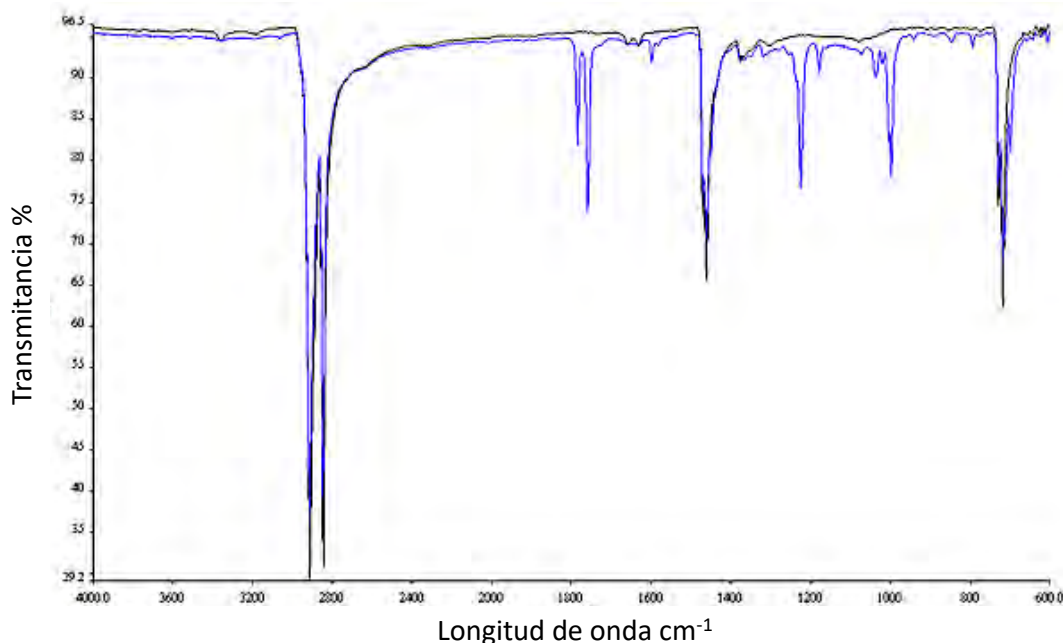
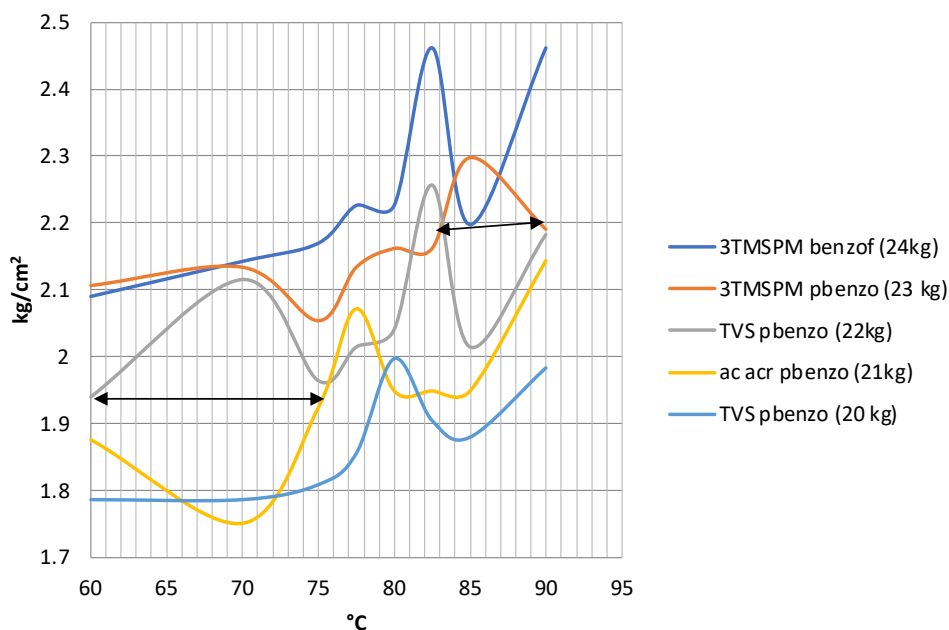


Figura 2. Espectroscopia de Infrarrojo del polietileno, línea color negro Polietileno sin modificar y línea azul polietileno modificado con acrilato

En las curvas de sellado hay máximos y mínimos (Figura 3). Una curva de sellado aceptable es la que presenta la menor cantidad posible de mínimos y un máximo, de preferencia que la curvatura sea amplia; esto proporciona un margen mayor para las variaciones de temperatura en los procesos de envasado. El análisis de sellado de las películas de polietileno se realizó hasta 90°C, a temperaturas más altas la película se adhería a la soldadura, a 100°C se retraía la soldadura y ya no era posible abrirla, igualmente a 110°C se fundía el material, adhiriéndose a las fauces de la selladora. Se aprecia que la película con siloxano con 23kg_f presenta una curva de sellado con una cresta desde 83 a 90°C, el polietileno comercial sin tratamiento tiene una temperatura de sellado de 110°C (Iwasaki, Toshiharu et col. 2016). Se calcula un ahorro de energía de 110 kVA/hora. En la figura 3b se muestra una fotografía de las películas y su aspecto final después de una prueba de sellado. Se aprecia el encogimiento de la soldadura conforme aumenta la temperatura.



(a)

Figura 3. a) Curvas de sellado con diferentes monómeros y fuerza de selle y b) fotografía del selle de las películas de polietileno



(b)

Figura 3 (Continuación). a) Curvas de sellado con diferentes monómeros y fuerza de selle y b) fotografía del selle de las películas de polietileno

Analizando la efectividad de los monómeros, se aprecia que los acrílicos (ácido acrílico y TMSPM) tienen mejores propiedades adhesivas en comparación con el TVS. Esto se debe a que los adhesivos acrílicos son formulados para tener viscosidad baja controlable, la cual hace posible una rápida y precisa distribución en las partes que serán unidas. Además, el curado rápido sin la necesidad de que se encuentre largos periodos de tiempo en hornos hace estos adhesivos particularmente útiles para ensamblar varios componentes en una línea de producción automática o semi – automática (Packham, 2005).

Las pruebas de tracción ASTM, el PE con siloxano tuvo una carga máxima de 43.46 ± 2.0 kgf, máximo desplazamiento 160.77 ± 1.5 mm, máximo esfuerzo 1.436 ± 2.4 kgf/mm², máxima deformación de 595.45 ± 5.2 % y 8.94 ± 8.4 kgf/mm² para 10, 20 kgf. Estos resultados son comparables con el polímero Tafmer® que es una mezcla de polipropileno-polietileno (carga máxima de 50.43 ± 1.5 kgf, máximo desplazamiento 180.17 ± 3.8 mm, máximo esfuerzo 1.528 ± 1.2 kgf/mm², máxima deformación de 600.59 ± 7.2 % y 8.34 ± 3.4 kgf/mm² para 10, 20 kgf.) (Meka, P. y col 1994).

Conclusiones

El uso de monómeros de ácido acrílico y siloxano en las películas de polietileno permitió mejorar sus propiedades de adhesión. La temperatura de sellado presentó un umbral de operación entre 83 y 90 °C, inferior al del polietileno comercial sin modificar, lo que representa un potencial ahorro en el consumo de energía eléctrica durante el proceso de sellado.

Asimismo, las pruebas de tracción confirmaron que las películas modificadas presentan propiedades mecánicas comparables o superiores a las comerciales. A pesar de que ambas muestran valores similares de alargamiento y módulo elástico, las películas sintetizadas ofrecen mejor desempeño general, lo que respalda la eficacia de la modificación superficial realizada.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de Ciudad Madero por el apoyo económico recibido, así como por el uso de las instalaciones del Centro de Investigación en Petroquímica.

Bibliografía

Hernández Martínez, A. (2012). *Copolímero de poliolefinas con baja temperatura de selle*. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

- Iwasaki, Toshiharu, Takarada, Wataru, & Kikutani, Takeshi. (2016). Influence of processing conditions on heat sealing behavior and resultant heat seal strength for peelable heat sealing of multilayered polyethylene films. *Journal of Polymer Engineering*, 36(9), 909–916. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2015-0383>
- Meka, P., & Stehling, F.C. (1994). Heat sealing of semicrystalline polymer films. I. Calculation and measurement of interfacial temperatures: The effect of process variables on seal properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 51, 89–103. <https://doi.org/10.1002/app.1994.070510111>
- Packham, D.E. (2005). *Handbook of Adhesion*. John Wiley & Sons. ISBN: 9780471808749 | Online ISBN: 9780470014226 | DOI: 10.1002/0470014229
- Saechtling, H. (2006). *Manuale delle materie plastiche*. Tecniche Nuove. ISBN: 884811671X, 9788848116718

Valorización de lodos residuales avícolas mediante procesos anaerobios con *L. plantarum* para la obtención de biomasas con potencial de consumo animal

Alondra Sánchez-Solano, Joaquín Estrada-García, Roger Emmanuel Sales-Pérez, Erik Samuel Rosas-Mendoza y Juan Manuel Méndez-Contreras

Laboratorio Ambiental II, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: juan.mc@orizaba.tecnm.mx; Tel.: (+52) 272 111 5889

Desarrollo Sustentable (Bioprocesos)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 28 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.517>

Resumen: El presente estudio aborda la problemática ambiental derivada de la generación de lodos residuales por la industria avícola, los cuales representan una fuente significativa de contaminación debido a su alta carga orgánica y microbiológica. Con el fin de desarrollar alternativas sostenibles para su manejo, se evaluó la valorización de estos residuos mediante fermentación anaerobia utilizando *Lactobacillus plantarum*. La metodología incluyó el acondicionamiento térmico del lodo a 120 °C durante una hora para reducir patógenos y mejorar su disponibilidad como sustrato, seguido de la inoculación con tres concentraciones de *Lactobacillus plantarum* o *L. plantarum* (5 %, 10 % y 15 %), bajo condiciones controladas de temperatura y pH. Durante 48 horas se monitorearon variables como el crecimiento bacteriano, consumo de carbohidratos, producción de biomasa y reducción de materia orgánica. El tratamiento con 5 % de inóculo presentó el mejor rendimiento, alcanzando 0.344 g de biomasa/g de carbohidrato consumido, con un coeficiente de conversión de 0.343 y un ajuste al modelo logístico con $R^2 = 0.964$, lo que refleja una cinética de crecimiento estable y eficiente. Asimismo, se logró una reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) del 56.8 %, junto con la inactivación completa de patógenos como huevos de helminto o coliformes fecales. Adicionalmente, el proceso favoreció la solubilización de nutrientes, especialmente carbohidratos fermentables, y permitió la obtención de una biomasa con hasta 32.5 % de proteínas, lo que refuerza su potencial como suplemento proteico en la alimentación animal. En conjunto, esta estrategia representa una alternativa biotecnológica viable para transformar residuos avícolas en productos de valor agregado, alineándose con principios de sustentabilidad y economía circular.

Palabras clave: Lodos residuales avícolas, *Lactobacillus Plantarum*, Fermentación anaerobia, Biomasa

Valorization of poultry slaughterhouse sludge through anaerobic processes with *L. plantarum* for the production of biomass with potential use in animal feed

Abstract: This study addresses the environmental and productive challenges posed by the generation of residual sludge from the poultry industry, which represents a significant source of pollution due to its high organic and microbiological load. In order to develop sustainable alternatives for its management, the valorization of poultry waste sludge was evaluated through anaerobic fermentation using *Lactobacillus plantarum*. The methodology involved thermal conditioning of the sludge at 120 °C for one hour to reduce pathogens and enhance substrate availability, followed by inoculation with three concentrations of *Lactobacillus plantarum* or *L. plantarum* (5 %, 10 %, and 15 %) under controlled temperature and pH conditions. For 48 hours, bacterial growth, carbohydrate consumption, biomass production, and organic matter reduction were monitored. The treatment with 5 % inoculum showed the highest yield, reaching 0.344 g of biomass per g of carbohydrate consumed, with a biomass-to-substrate conversion coefficient of 0.343 and a logistic model fit of $R^2 = 0.964$, indicating stable and efficient microbial growth kinetics. Furthermore, a 56.8 % reduction in chemical oxygen demand (COD) was achieved, along with the complete inactivation of pathogens such as helminth egg and fecal coliform. Additionally, the process favored the solubilization of nutrients, particularly fermentable carbohydrates, and led to the production of biomass containing up to 32.5 % protein, reinforcing its potential use as a protein-rich supplement in animal feed. Altogether, this biotechnological approach offers a viable alternative for transforming poultry waste into value-added products, contributing to sustainability and aligning with circular economy principles.

Keywords: Poultry residual sludge, *Lactobacillus plantarum*, Anaerobic fermentation, Biomass

Introducción

La producción avícola global ha experimentado un crecimiento sostenido en las últimas décadas, generando grandes volúmenes de residuos orgánicos (lodos, purines y efluentes) que representan un riesgo ambiental al contaminar suelos, cuerpos de agua y emitir gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O). En México, esta situación se ha agravado:

residuos agroindustriales, incluidas las descargas derivadas de la industria avícola, contribuyen de manera significativa al deterioro de la calidad del agua y los ecosistemas locales (Sales-Pérez *et al.*, 2025).

La industria avícola es un pilar económico que genera miles de empleos y abastece una parte sustancial de la demanda de proteína animal. Sin embargo, su manejo inadecuado de residuos ha ocasionado descargas con concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) y nutrientes que superan ampliamente los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT 2021). Esto ha derivado en problemas como eutrofización, disminución de oxígeno disuelto y proliferación de algas nocivas, afectando la biodiversidad y la salud pública.

En respuesta a esta problemática, *Lactobacillus plantarum* ha sido ampliamente estudiado como agente de fermentación anaerobia, al producir ácido láctico y enriquecer la biomasa con proteína y compuestos bioactivos. Investigaciones recientes han evidenciado que cepas de *L. plantarum* (*Lactobacillus plantarum*) aplicadas a subproductos avícolas mejoran la digestibilidad, reducen patógenos y optimizan la salud intestinal de pollos de engorde (Yang *et al.*, 2024; Loo *et al.*, 2025).

El presente estudio evalúa un proceso de biotransformación anaerobia aplicado a lodo avícola residual mediante el uso de *L. plantarum*, con el objetivo de reducir la DQO, eliminar microorganismos patógenos, liberar carbohidratos fermentables y producir biomasa con potencial uso en alimentación animal. Se utilizaron tres concentraciones de inóculo (5 %, 10 % y 15 %) y se analizaron variables fisicoquímicas y microbiológicas, así como el crecimiento celular y el consumo de carbohidratos, ajustados mediante un modelo logístico. Este enfoque propone una alternativa sustentable para el aprovechamiento de residuos avícolas dentro del marco de la economía circular agroindustrial.

Materiales y Métodos

Recolección y caracterización de la muestra

El lodo residual avícola fue proporcionado por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de una planta procesadora de aves de la región de las Altas Montañas. Esta instalación genera una cantidad significativa de lodos residuales como subproducto de sus procesos de sacrificio y eviscerado, los cuales contienen una alta carga orgánica y microbiológica. La recolección se realizó siguiendo protocolos estandarizados para garantizar la representatividad de la muestra, asegurando que proviniera de un punto de descarga con un flujo constante y características homogéneas. Posteriormente, el lodo fue transportado bajo condiciones controladas para evitar su degradación antes de ser sometido a los tratamientos biológicos propuestos en esta investigación.

Para su caracterización fisicoquímica, se determinaron los siguientes parámetros: pH mediante método potenciométrico; sólidos totales, volátiles y fijos mediante métodos gravimétricos; demanda química de oxígeno mediante método colorimétrico; proteínas y carbohidratos mediante métodos específicos (Sulfúrico-Antrona); y nitrógeno total mediante el método Kjeldahl. Todas las determinaciones se realizaron con base en normas oficiales mexicanas o metodologías estándar (APHA 2017; SEMARNAT 2002a; SEMARNAT 2002b; SEMARNAT 2022; SALUD 1995, SALUD 2015).

La caracterización microbiológica del lodo residual es un paso crucial para conocer su composición en cuanto a bacterias, hongos y otros microorganismos. Se evaluó la presencia de patógenos como huevos de helminto y coliformes totales, así como la carga de bacterias anaerobias, aerobias, ácido lácticas, y hongos y levaduras, mediante métodos de cultivo selectivo y uso de placas Petrifilm. Esta caracterización permite estimar el riesgo sanitario y el potencial biotecnológico del lodo.

Acondicionamiento de la muestra (tratamiento térmico)

Se aplicó un tratamiento térmico a 120 °C durante una hora para el acondicionamiento de una muestra representativa, con el objetivo de reducir la carga microbiana y cumplir con los lineamientos establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002a), que regula el uso y disposición de biosólidos para proteger la salud pública y el ambiente, así como modificar la estructura del lodo para mejorar su disponibilidad para los procesos biológicos posteriores. Una vez

tratado, el lodo fue nuevamente caracterizado fisicoquímica y microbiológicamente con los parámetros antes mencionados, con el fin de evaluar el impacto del tratamiento térmico sobre sus propiedades iniciales.

Propagación de microorganismos anaerobios

La propagación de microorganismos anaerobios fue realizada en condiciones controladas. *L. plantarum* fue cultivado en medio Man, Rogosa & Sharpe (MRS) líquido, a 37 °C y 120 rpm, bajo condiciones anaerobias. El cultivo se realizó en tubos de ensayo, y estas bacterias fueron utilizadas posteriormente para la fermentación del lodo.

Proceso de fermentación anaerobia

La biotransformación del lodo se llevó a cabo mediante un proceso biológico complementario: La fermentación anaerobia se realizó utilizando *L. plantarum* en medio MRS, bajo condiciones anaerobias, a 37 °C y con agitación constante de 120 rpm. Este proceso permite mejorar la digestibilidad del lodo y aumentar su contenido en metabolitos valiosos como proteínas y ácido láctico.

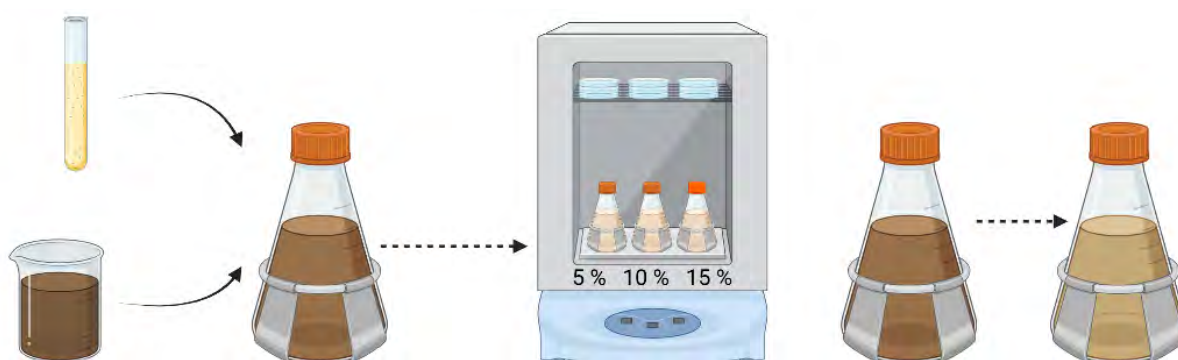


Figura 1. Proceso de biotransformación del lodo residuo avícola mediante *L. plantarum*

Cinética de biotransformación del lodo avícola mediante *Lactobacillus plantarum*

Para evaluar la eficiencia del proceso de fermentación anaerobia, se realizaron ensayos cinéticos en matraces Erlenmeyer de 250 mL, utilizando lodo tratado térmicamente como sustrato. A cada matraz se le agregó una concentración distinta de inóculo de *L. plantarum* (5 %, 10 % y 15 % v/v), generando tres tratamientos experimentales. Los matraces se incubaron a 37 °C, en condiciones anaerobias y con agitación constante de 120 rpm durante 48 horas. Cada cuatro horas se recolectaron muestras, a las que se les realizó determinación de carbohidratos totales, pH, conteo celular de *Lactobacillus plantarum*.

Evaluación del rendimiento de biomasa y análisis comparativo de la fermentación anaerobia

Para la evaluación del rendimiento del proceso de fermentación anaerobia, se establecieron criterios comparables centrados en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Se monitoreó, el consumo de carbohidratos, pH y crecimiento celular, así como la biomasa generada.

El proceso de fermentación anaerobia con *Lactobacillus plantarum*, realizado a diferentes concentraciones de inóculo mencionadas anteriormente, se realiza con el fin para evaluar su influencia sobre la velocidad de transformación del lodo tratado térmicamente, bajo condiciones estrictamente anaerobias. Durante el proceso, se realizaron dos réplicas del proceso con muestreos periódicos cada 4 horas a lo largo de 48 horas para registrar las variaciones de los parámetros establecidos.

Finalmente, los datos obtenidos en el proceso fueron sistematizados para su análisis comparativo. El análisis cinético se planteó utilizando el modelo logístico para el caso de la fermentación anaerobia con el fin describir el comportamiento del crecimiento microbiano en condiciones controladas.

Resultados y Discusión

Se realizaron análisis fisicoquímicos y microbiológicos tanto al lodo tratado como al lodo sin tratamiento para comparar sus características y evaluar el impacto del tratamiento térmico. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica para el lodo residual avícola

Concentración (%v/v)	No tratado	Tratado térmicamente
pH	7.49 ± 0.01	6.64 ± 0.01
Nitrogeno (%)	0.40 ± 0.053	0.20 ± 0.042
Proteínas (%)	2.5 ± 0.15	1.25 ± 0.10
Carbohidratos (g/L)	17.09 ± 0.03	19.098 ± 0.034
Sólidos totales (%)	0.989 ± 0.07	3.405 ± 0.09
Sólidos volátiles (%)	0.486 ± 0.04	2.782 ± 0.06
Sólidos fijos (%)	0.503 ± 0.032	0.623 ± 0.065
Bacterias aerobias (UFC/mL)	7.41 × 10 ⁶	6.54
Hongos y levaduras (UFC/mL)	3.25 × 10 ⁵	1.375
DQO total (mg/L)	25,000 ± 2,000	20,000 ± 1,500
DQO soluble (mg/L)	3,500 ± 500	7,000 ± 800
Fósforo total (mg/L)	80 ± 5	95 ± 6
Huevos de helmintos	No detectados	No detectados

Reducción de patógenos

El tratamiento térmico a 120 °C por una hora resultó eficaz para reducir la carga microbiana, eliminando completamente los coliformes fecales y huevos de helmintos. También se observó una notable disminución en bacterias aerobias y hongos/levaduras. Estos resultados concuerdan con estudios previos, como los de Pratap *et al.*, (2024), que señalan la efectividad de temperaturas superiores a 70 °C durante una hora para eliminar patógenos como *Ascaris* spp., y Coe *et al.* (2022), quienes reportaron la inactivación de *Salmonella*. a 75, 85 y 95 °C en 3 minutos. Siendo estos parámetros muy comunes para la eliminación de organismos patógenos (Estrada-García *et al.*, 2023). El tratamiento térmico también causó un descenso en el pH (de 7.49 a 6.64) y un incremento en sólidos totales, volátiles y fijos, lo que favorece procesos como la fermentación anaerobia, al aumentar la biodisponibilidad de compuestos fermentables y reducir microorganismos indeseados. Esto coincide con lo reportado por Bulkowska y Zielinska (2024), que a temperaturas (60 a 120 °C), típicamente asociadas con la hidrólisis térmica, la energía térmica induce principalmente la solubilización de los componentes, particularmente proteínas y polisacáridos de alto peso molecular. Durante esta fase, se exponen grupos funcionales hidrofílicos, como grupos hidroxilo y amino, lo que incrementa la repulsión electrostática entre las partículas del lodo. Esto da lugar a la formación de una red similar a un gel que retiene agua dentro de la matriz del lodo, provocando una mayor viscosidad y una menor capacidad de deshidratación.

Solubilización de materia orgánica y nutrientes

Se evidenció un aumento en sólidos solubles y carbohidratos, lo que indica una hidrolización parcial de la materia orgánica. Esto concuerda con estudios que demuestran que tratamientos térmicos entre 125 y 175 °C mejoran la solubilización de compuestos orgánicos y aumentan la biodegradabilidad del lodo en la digestión anaerobia (Pratap *et al.*, 2024). Sin embargo, se observó una disminución en el contenido de nitrógeno, posiblemente asociada a procesos previos de nitrificación y desnitrificación.

Con el objetivo de contextualizar y respaldar los resultados obtenidos tras el tratamiento térmico del lodo residual avícola, se llevó a cabo un análisis comparativo con investigaciones recientes que emplearon metodologías similares en el tratamiento de residuos agroindustriales mediante hidrólisis térmica o procesos fermentativos. La Tabla 2 presenta la comparación de los principales parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en este estudio con los reportados por Méndez-Contreras *et al.* (2024) y Flores-Asis *et al.* (2019).

Bulkowska y Zielinska (2024), mencionan que emplearon un proceso de desintegración térmica con lodo residual activado. Esta comparación permite evidenciar similitudes y diferencias en el comportamiento del sustrato bajo condiciones térmicas y biológicas, así como valorar el desempeño del proceso desarrollado en esta investigación en relación con experiencias previas documentadas en la literatura científica (Hoque y Debi, 2025).

Tabla 2. Análisis comparativo de resultados de la caracterización fisicoquímica y microbiológica en el empleo del pretratamiento térmico (comparativa con otros autores)

Parámetro	Lodo avícola tratado térmicamente (presente estudio)	Lodo avícola tratado y suplemento con micronutrientes (Méndez-Contreras <i>et al.</i> , 2024)	Lodo avícola tratado para la producción de biogás (Flores-Asis <i>et al.</i> , 2019)
pH	6.64	6.35	6.89
Nitrógeno (%)	0.20	5.11	6.5
Proteínas (%)	1.25	-	18.23
Carbohidratos g/L	19.10	-	0.57
Sólidos Totales (%)	3.41	3.18	1.56
Sólidos Volátiles (%)	2.78	73.10	70.83
Sólidos Fijos (%)	0.62	-	-
Bacterias aerobias (UFC/ml)	6.54	-	-
Hongos y levaduras (UFC/ml)	1.38	-	-
DQO Total (mg/L)	20,000	-	1,759.4
DQO Soluble (mg/L)	7,000	14,282	
Fósforo Total (mg/L)	95	2.35	25 Ppm
Huevos de helmintos	No detectados	< 3	-
Coliformes fecales (UFC/ml)	0	< 3	-

El lodo residual avícola tratado térmicamente en este estudio presentó un pH de 6.64, diferente con los valores reportados por Bulkowska y Zielinska (2024) de un pH de 10, lo que indica un entorno adecuado para la fermentación anaerobia. El contenido de nitrógeno total (0.20 %) y proteínas (1.25 %) fue inferior al observado en ambos estudios comparativos, posiblemente debido al sistema de tratamiento primario (DAF) que favorece la eliminación de compuestos nitrogenados, lo cual podría limitar su uso sin suplementación externa.

El contenido de carbohidratos (19.1 g/L) fue mayor al de los estudios revisados, lo que garantiza una fuente fermentable favorable para el crecimiento de *L. plantarum*. La concentración de sólidos totales (3.41 %) indica una adecuada densidad de materia orgánica, mientras que los sólidos volátiles y fijos se mantuvieron dentro de rangos esperados (Flores-Asis *et al.*, 2019). Esto facilita el mezclado y homogenización del sistema, lo cual favorece el intercambio de masa (Estrada-García *et al.*, 2023). La carga microbiana se redujo drásticamente tras el tratamiento térmico, permitiendo condiciones óptimas para la inoculación selectiva.

La DQO total fue de 20,000 mg/L, con una fracción soluble de 7,000 mg/L, lo cual refleja una buena disponibilidad de sustrato degradable. El fósforo total (95 mg/L) se mantuvo dentro del rango óptimo para procesos biotecnológicos. Finalmente, la eliminación total de coliformes fecales demuestra la efectividad del tratamiento térmico y el cumplimiento con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT 2002a), posicionando a este lodo como un biosólido seguro y potencialmente reutilizable (Méndez-Contreras *et al.*, 2024).

Mejora en la fermentabilidad y uso en bioprocesos

Los niveles elevados de carbohidratos en ambas muestras sugieren un ambiente favorable para el crecimiento de *L. plantarum*. Sin embargo, el tratamiento térmico aumentó la biodisponibilidad de azúcares, lo que podría mejorar la producción de ácido láctico durante la fermentación anaerobia.

Cinéticas de biotransformación del lodo residual con *L. plantarum*

Se evaluó la biotransformación anaerobia del lodo usando *L. plantarum* a concentraciones de inóculo del 5%, 10% y 15%. Las fermentaciones se realizaron en matraces Erlenmeyer de 250 mL con 200 mL de volumen total. Se incubaron a 37 °C con agitación de 120 rpm durante 48 horas. Cada 4 horas se tomaron muestras de 2 mL para medir concentración de carbohidratos, crecimiento celular (UFC/mL en agar MRS) y pH. El modelo matemático utilizado para estas cinéticas es el Modelo Logístico como se presenta en la Ecuación 1.

$$Y = \frac{a}{1 + \exp [-k_s(x - T_i)]} \quad (1)$$

Donde: Y representa la variable respuesta, que puede ser: La concentración remanente de carbohidratos (g/L) en función del tiempo, o el crecimiento celular expresado como log UFC/mL; x es el tiempo transcurrido en horas desde el inicio de la fermentación; a corresponde al valor máximo alcanzado por la variable; Y : Para carbohidratos, representa la concentración inicial total, para biomasa microbiana, la biomasa máxima observada al final del periodo; k_s es la tasa máxima específica, que indica la velocidad del proceso, ya sea de consumo o crecimiento; T_i es el tiempo de inflexión o latencia, correspondiente al período inicial en que no se observa un cambio significativo en la variable, representando la adaptación metabólica o celular al ambiente del lodo.

Aplicación para el consumo de carbohidratos

Durante las primeras horas, los carbohidratos presentes en el lodo residual permanecen relativamente estables debido a la fase de adaptación de las bacterias. A partir del tiempo T_i , *L. plantarum* comienza a metabolizar activamente los carbohidratos, lo que se traduce en una disminución acelerada en su concentración, reflejada en la curva logística descendente (cuando se grafican los carbohidratos consumidos, se puede usar la transformación $a - Y$, para visualizar la disminución).

Aplicación para el crecimiento celular

El crecimiento microbiano sigue una dinámica típica, donde tras un tiempo de latencia T_i , las células entran en fase exponencial con una tasa máxima k_s , hasta alcanzar una biomasa máxima a , donde el crecimiento se estabiliza por limitaciones de sustrato o acumulación de productos metabólicos.

Parámetros comparativos

La comparación entre los diferentes porcentajes de inóculo (5%, 10%, 15%) permite evaluar cómo varían los parámetros k_s y T_i , proporcionando información sobre: La rapidez con que *L. plantarum* adapta y consume carbohidratos en el lodo. La velocidad y magnitud del crecimiento celular en función de la concentración inicial de bacterias inoculadas.

En el inóculo del 5 % se observó un crecimiento sostenido hasta 36 h alcanzando ~11.0 Log UFC/mL. El consumo de carbohidratos fue completo hacia el final del experimento, mostrando eficiencia en la conversión de sustrato como se observa en la Figura 3.

En el inóculo del 10% % se observó un crecimiento más acelerado, alcanzando ~11.6 Log UFC/mL en 24–32 h, y consumo completo de carbohidratos hacia las 60 h. Se logró una bioconversión más rápida como se aprecia en la Figura 4.

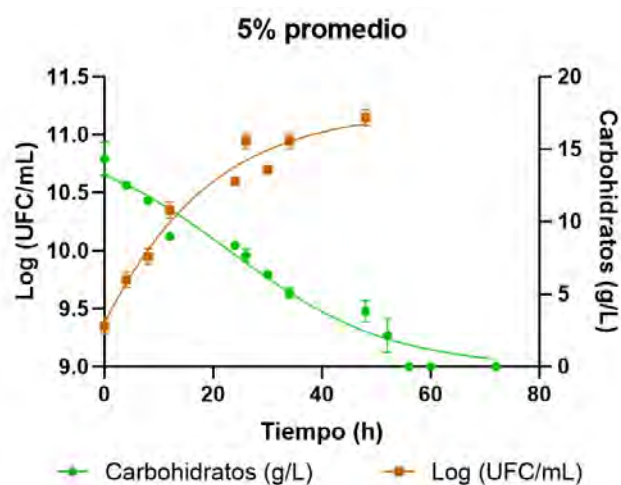


Figura 3. Crecimiento celular con inóculo del 5 % *L. plantarum*

En el inóculo del 15 % se observó mayor velocidad de crecimiento inicial (~ 11.8 Log UFC/mL en 24 h), pero con una caída abrupta después de 40 h. Esto sugiere inhibición por acumulación de metabolitos o agotamiento de nutrientes como se observa en la Figura 5.

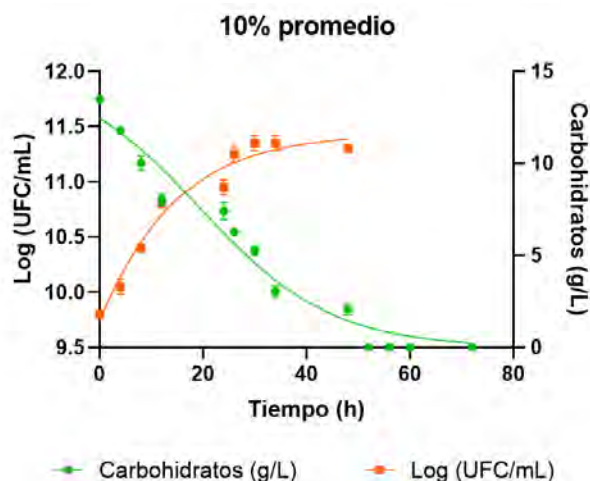


Figura 4. Crecimiento celular con inóculo del 10 % *L. Plantarum*

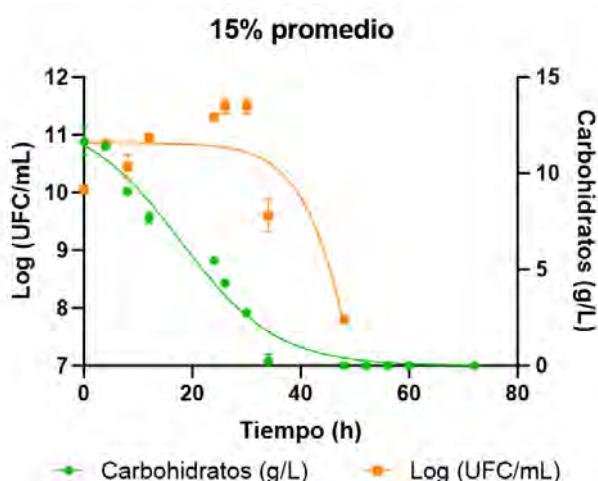


Figura 5. Crecimiento celular con inóculo del 15 % *L. Plantarum*

Tabla 3. Resultados del rendimiento de biomasa producida con *L. Plantarum*

Concentración (%v/v)	Rendimiento g biomasa/g carbohidratos	Tiempo de evaluación (horas)
5	0.344	48
10	0.181	48
15	0.239	30

Tabla 4. Parámetros cinéticos obtenidos con el modelo Logístico de tres parámetros del proceso de biotransformación con *L. Plantarum*

Concentración (%v/v)	K_s (h^{-1})	μ_{max} (h^{-1})	λ (h)	a [Log UFC/ml]	$Y_{B/S}$ [LogUFC. g^{-1}]	R^2
5	0.061	0.1702	-59.79	11.21	0.343	0.964
10	0.077	0.220	-48.62	11.43	0.341	0.965
15	-0.182	-0.494	63.95	10.86	0.375	0.582

Comparativa con estudios recientes sobre fermentación anaerobia con *Lactobacillus plantarum*

Con el propósito de contextualizar y validar los resultados obtenidos en este estudio, se compararon parámetros de rendimiento de biomasa y cinética microbiana con tres investigaciones recientes que aplicaron fermentación anaerobia usando *Lactobacillus plantarum* sobre residuos agroindustriales que se observan en la Tabla 4. Haokok *et al.* (2023) aplicaron *L. plantarum* TSKKU P-8 junto a *Levilactobacillus brevis* en bagazo de caña prehidrolizado mediante enzimas, utilizando un proceso combinado de hidrólisis y co-fermentación (SScF). Reportaron una alta producción de ácido láctico y modelaron la cinética con un buen ajuste logístico

Derabli *et al.* (2022) estudiaron la fermentación de residuos de *Opuntia ficus-indica* (cactus) con *L. plantarum*, tras digestión ácida, alcanzando un rendimiento notable de biomasa e influyendo positivamente en la nutrición microbiana, también respaldado por un sólido ajuste al modelo logístico. Akermann *et al.* (2021) cultivaron *L. delbrueckii* Subsp.

lactis en granos gastados de cerveza, modelando su crecimiento con un modelo logístico, obteniendo $\mu_{max} \approx 0.43 \text{ h}^{-1}$, y un ajuste ($R^2 \approx 0.99$).

Tabla 5. Análisis comparativo de parámetros cinéticos y rendimiento microbiano

Estudio	Sustrato	Inóculo (%)	Rendimiento (g biomasa/g carbohidrato)	μ_{max}	λ (h)	R^2
Presente estudio	Lodo avícola* (térmico)	5	0.344	0.1702	-59.8	0.964
Akermann <i>et al.</i> (2021)	Granos gastados de cerveza	-	0.31	0.43-0.46	≈ 25.4	0.99
Derabli <i>et al.</i> (2022)	Residuos de <i>Opuntia</i>	-	0.12	0.18-0.36	-	0.98
Estrada-García <i>et al.</i> (2023)	Excretas porcinas	-	0.27	0.11-0.057	5.73-12.67	0.945

El rendimiento obtenido con 5 % inóculo (0.344 g biomasa/g carbohidrato) es superior a los valores reportados en estudios previos (0.27–0.31), demostrando alta eficiencia. Por otro lado, la tasa μ_{max} (0.170 h⁻¹) es menor que las de comparación, lo cual puede deberse a la complejidad del sustrato (lodo residual con componentes resistentes). Sin embargo, la R^2 (0.964) indica un ajuste fuerte al modelo logístico. Las fases de latencia (λ) difieren debido a condiciones distintas de inoculación y sustratos, pero tu modelo fue robusto en tiempo y ajuste.

Conclusiones:

La presente investigación demostró el potencial del lodo residual avícola como sustrato para la generación de biomasa con aplicación en la industria de alimentación animal, mediante su biotransformación a través de procesos anaerobios con *L. plantarum*. La caracterización inicial del lodo evidenció una alta carga orgánica y microbiológica, lo cual representa un riesgo ambiental si no se gestiona adecuadamente, pero también una oportunidad para su valorización biotecnológica. El tratamiento térmico previo permitió reducir significativamente la carga patógena y mejorar la disponibilidad de nutrientes, favoreciendo el proceso de fermentación. *L. plantarum* mostró una alta capacidad de adaptación y crecimiento, especialmente a concentraciones de inóculo de 10 % y 15 %, logrando una transformación eficiente del lodo en biomasa rica en proteínas y compuestos bioactivos. El análisis cinético, modelado mediante la ecuación logística, confirmó el comportamiento favorable del crecimiento microbiano bajo estas condiciones.

El aprovechamiento de lodos residuales de plantas procesadoras de aves mediante procesos anaerobios representa una estrategia viable para la generación de biomasa con potencial uso en la industria alimentaria animal. Los resultados obtenidos sugieren que este proceso es eficiente tanto en términos de producción de biomasa como en la reducción de contaminantes. Esta investigación contribuye al desarrollo de estrategias sustentables en el sector avícola, promoviendo un enfoque de economía circular mediante la valorización de residuos orgánicos, la mitigación del impacto ambiental y la obtención de productos funcionales a partir de desechos agroindustriales.

Agradecimientos y financiamiento:

Sánchez-Solano agradece el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada con CVU: 1340477, de la misma manera se agradece el financiamiento de la presente investigación al Tecnológico Nacional de México a través del proyecto TecNM 20264.24-P, los cuales hicieron posible la realización de este trabajo.

Bibliografía

Akermann, A., Weiermüller, J., Lenz, S., Christmann, J., & Ulber, R. (2021). Kinetic model for simultaneous saccharification and fermentation of brewers' spent grain liquor using *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *lactis*. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 26, 114–124. <https://doi.org/10.1007/s12257-020-0153-z>

APHA. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.

Bulkowska, K., & Zielińska, M. (2024). Thermal disintegration of waste-activated sludge. *Energies*, 17(17), 4447. <https://doi.org/10.3390/en17174447>

- Coe, C., Boltz, T., Stearns, R., Foster, P., Taylor, J. R. L., Moritz, J., Jaczynski, J., Freshour, A., & Shen, C. (2022). Thermal inactivation of *Salmonella* Typhimurium and surrogate *Enterococcus faecium* in mash broiler feed in a laboratory scale circulated thermal bath. *Poultry Science*, 101(8), 101234. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101976>
- Derabli, B., Nancib, A., Nancib, N., Aníbal, J., Raposo, S., Rodrigues, B., & Boudrant, J. (2022). *Opuntia ficus-indica* waste as a cost-effective carbon source for lactic acid production by *Lactobacillus plantarum*. *Food Chemistry*, 370(1), 131005. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131005>
- Estrada-García, J., Hernández-Aguilar, E., Romero-Mota, D. I., & Méndez-Contreras, J. M. (2023). Influence of anaerobic biotransformation process of agro-industrial waste with *Lactobacillus acidophilus* on the rheological parameters: Case study of pig manure. *Archives of Microbiology*, 205, 99. <https://doi.org/10.1007/s00203-023-03437-8>
- Flores-Asís, R., Méndez-Contreras, J. M., Alvarado-Lassman, A., Fernández-Lambert, G., Villanueva-Vásquez, D., & Aguilar-Lasserre, A. A. (2019). Analysis of the behavior for operation parameters in the anaerobic digestion process with thermal pretreatment, using fuzzy logic. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54(6), 592–602. <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1593010>
- Hoque, M., & Devi, K. T. R. (2025). Agro-industrial waste management: Solid-state fermentation for biomass conversion and valorisation to value-added products. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*, 5, 990–999. <https://doi.org/10.1007/s43393-025-00371-2>
- Loo, J. S., Oslan, S. N. H., Mokshin, N. A. S., Othman, R., Amin, Z., Dejtsakdi, W., Prihanto, A. A., & Tan, J. S. (2025). Comprehensive review of strategies for lactic acid bacteria production and metabolite enhancement in probiotic cultures: Multifunctional applications in functional foods. *Fermentation*, 11(5), 241. <https://doi.org/10.3390/fermentation11050241>
- Méndez-Contreras, J. M., Atenodoro-Alonso, J., López-Escobar, L. A., & Nava-Valente, N. (2024). Enhanced biogas production from thermophilic anaerobic digestion of poultry slaughterhouse sludge: Effect of thermal pretreatment and micronutrients supplementation. *Waste and Biomass Valorization*, 15, 2201–2214. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02277-3>
- Pratap, V., Kumar, S., & Ram Yadav, B. (2024). Sewage sludge management and enhanced energy recovery using anaerobic digestion: An insight. *Water Science and Technology*, 90(3), 696–720. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.269>
- Sales-Pérez, R. E., Estrada-García, J., Hernández-Martínez, J. M., Pérez-Guzmán, S. M., & Méndez-Contreras, J. M. (2025). Kinetics of biological treatment of poultry slaughterhouse wastewater in photobioreactors operated with *Nannochloropsis oculata*: A strategy for the valorization of agro-industrial effluents. *Waste and Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-025-03415-9>
- SALUD. (1995). NOM-112-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes totales en placa por el método del número más probable (NMP). Diario Oficial de la Federación, 18 de agosto de 1995.
- SALUD. (2015). NOM-210-SSA1-2014. Productos y servicios. Métodos para la detección de *Salmonella* spp. en productos alimenticios. Diario Oficial de la Federación, 26 de enero de 2015.
- SEMARNAT. (2002a). NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental—Lodos y biosólidos—Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación, 15 de agosto de 2003.
- SEMARNAT. (2002b). NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 2002.
- SEMARNAT. (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Diario Oficial de la Federación, 11 de marzo de 2022.
- Yang, C., Wang, S., Li, Q., Zhang, R., Xu, Y., & Feng, J. (2024). Effects of probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* HJLP 1 on growth performance, antioxidant activity and cecal microflora in broiler chickens. *Animals*, 14(5), 668. <https://doi.org/10.3390/ani14050668>

Microplásticos en el medio ambiente y separadores ciclónicos como alternativa de mitigación. Una revisión

Cecilia Ortiz-Alvarez ¹, Esperanza Rodríguez-Morales ^{1,*}, Osvaldo Rubio-López ² Ana Laura Martínez-Hernández ¹

¹ Maestría en Ingeniería, Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro, Querétaro, Querétaro, México

² Departamento de Ingeniería y Desarrollo Tecnológico, Universidad Politécnica de Querétaro

* Autor de correspondencia: esperanza.rm@queretaro.tecnm.mx

Contaminación de agua, suelo y aire (Tratamiento de aguas residuales)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 21 de julio de 2025

Publicado: 29 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.505>

Resumen: La contaminación por microplásticos, hoy en día, es una problemática a nivel global, ya que las afectaciones ambientales y a la salud que estos agentes provocan han crecido en forma preocupante. Derivado de esta problemática, se han realizado estudios para desarrollar técnicas que permitan la mitigación, identificación y tratamiento de estos contaminantes. En el presente artículo se realiza una exploración identificando datos bibliométricos sobre el estudio de la presencia de microplásticos en la atmósfera, así como su caracterización. Además, se abordan investigaciones sobre separadores ciclónicos, en donde se determina su eficiencia y los parámetros relevantes para el aumento de ésta, para con ello poder ser considerados como tecnologías aplicables a la mitigación de contaminación por microplásticos.

Palabras clave: microplásticos, caracterización de microplásticos, contaminación de aire, mitigación, ciclón separador, material particulado

Microplastics in the environment and cyclone separators as a mitigation alternative: A review

Abstract: Microplastic pollution is a global problem today, as the environmental and health impacts caused by these agents have grown alarmingly. As a result of this problem, studies have been conducted to develop techniques for mitigating, identifying, and treating these pollutants. This paper explores by identification of bibliometric data the presence of microplastics in the atmosphere, as well as their characterization and sampling techniques. It also addresses research on cyclone separators, determining their efficiency and the parameters important for increasing it, so that they can be considered as technologies applicable to mitigating microplastic pollution.

Keywords: microplastics, microplastic characterization, air pollution, mitigation, cyclone separator, particulate matter

Introducción

El estudio de los microplásticos ha tomado relevancia en los últimos años, ya que representa una problemática a nivel global que debe ser atendida. Si bien dicha problemática ha tomado auge en la última década, la identificación de este contaminante se realizó en 1960, en ambientes marinos (Thompson *et al.*, 2004), y no fue hasta 2004 que los microplásticos fueron estudiados de manera específica por Richard Thompson, definiéndolos como materiales poliméricos con un diámetro menor a 5 mm.

A partir de esta definición muchas investigaciones se centraron en la contaminación y afectaciones al medio ambiente por estas partículas, como es la contaminación en agua causando su transporte por corrientes marinas, afectaciones a la densidad y su funcionamiento para transportar otros contaminantes. Además de la ingesta de microplásticos por animales marinos lo que provoca alteraciones en su comportamiento y genética (ONU, 2023). La contaminación por microplásticos en suelo puede provocar una disminución en fósforo, salinidad y nitrógeno, cuyas propiedades son esenciales para el crecimiento de la vegetación, por lo que, al estar en contacto con dichos contaminantes, el desarrollo de la vegetación se realiza de manera que sufre perturbaciones (He *et al.*, 2024). La contaminación del aire en la atmósfera es otro aspecto importante para considerar. Así como en los océanos los microplásticos son arrastrados, también las corrientes de viento pueden trasladar estos contaminantes a lugares remotos, lo que provoca un mayor contacto con los seres humanos potenciando los riesgos a la salud (Sotomayor Mondragón & Vera Granada, 2020).

Debido a la presencia de estos contaminantes en el medio ambiente es que surge el interés del estudio de microplásticos en el cuerpo humano, así como de sus repercusiones en la salud; en 2018 se encuentran, por primera

vez, partículas microplásticas en heces humanas (Libemann B. *et al.*, 2018). Así diferentes estudios comienzan a revelar afectaciones en pulmones, cáncer y efectos negativos neurológicos (Zhang *et al.*, 2020) y dermatitis por constante contacto con la piel (Castañeta *et al.*, 2020).

A causa de la contaminación ambiental por microplásticos y las afectaciones a la salud humana por su presencia, su identificación y mitigación han tomado relevancia, por lo que la búsqueda de alternativas para su remoción se considera un factor importante para la solución de lo que ya se considera una problemática actual.

Una alternativa que puede ser considerada para la mitigación y separación de microplásticos en la atmósfera son los separadores ciclónicos, que son tecnologías industriales desarrolladas para el proceso de separación de material particulado, por lo que pueden ser empleados como medida precautoria para mitigar las emisiones de dicho material (Bahamondes Santos, J., 2008). Su funcionamiento por fuerza tangencial permite generar una espiral que desciende a la parte inferior y genera, mediante fuerza centrípeta, una segunda espiral que asciende, eliminando así, por la parte inferior, las partículas más gruesas, obteniendo en la parte superior las partículas más finas (Echeverri Londoño, 2006). Gracias a este funcionamiento es que tiene como ventaja un bajo costo de operación y mantenimiento, además de que el espacio requerido es poco, y no cuenta con partes móviles (Arismendy Barrera, 2013).

Los ciclones tienen diferentes tipos de aplicación, generalmente industriales, (Montijo-Valenzuela, 2021), entre estas aplicaciones se encuentra la recolección de polvos en hornos, en la industria alimenticia, minera y de construcción (Montijo-Valenzuela, 2021). Además, estos equipos separadores pueden ser empleados como medida precautoria para mitigar las emisiones de material particulado (Bahamondes Santos, J., 2008), estos pueden ser empleados como equipos pre-limpiadores (Bahamondes Santos, J., 2008), que pueden ayudar a aumentar la calidad en el aire.

La presente investigación realiza un análisis bibliométrico de los estudios que se han realizado con respecto a la contaminación por microplásticos, efectos a la salud, además de abordar temas de interés para su mitigación, como lo es el muestreo y caracterización de dichos contaminantes, sin dejar de lado el estudio de los separadores ciclónicos para remoción de material particulado.

Materiales y Métodos

Con el objetivo de recopilar y analizar información se realiza un estudio bibliométrico sobre contaminación por microplásticos, presencia y afectaciones al medio ambiente y a la salud humana. Se reportan las investigaciones de mayor relevancia en muestreo, caracterización y mitigación de dichos contaminantes. Por otro lado, se analiza información sobre el estudio de separadores ciclónicos, en donde se determina su eficiencia de operación y el tipo de material particulado que se somete al proceso de separación.

La recopilación de información se llevó a cabo mediante buscadores como Google Scholar, ScienceDirect y Multidisciplinary Digital Publish Institute (MDPI) por sus siglas en inglés, considerando únicamente artículos con acceso libre.

Los términos empleados para la búsqueda de información fueron “microplastics, microplastics pollution, characterization, health effects caused by microplastics”.

El universo de búsqueda fue acotado a los años 2014 a 2025, considerado los idiomas inglés y español con un total de 68 documentos.

Se categorizó y filtró la información, de acuerdo al número de publicaciones por año, país, número de citas, tipo de documento, nombre de revista, factor de impacto y cuartil. Además de subdividir la información con respecto a las investigaciones realizadas en materia de microplásticos, considerando afectaciones al ambiente, afectaciones a la salud y caracterización y, por otro lado, segmentando los referentes al estudio de separadores ciclónicos.

El análisis de datos se realizó mediante el uso de Documentos de Google como plataforma colaborativa, además del apoyo mediante el gestor bibliográfico Mendeley, y VOSviewer como herramienta para la visualización de las redes bibliométricas.

Resultados y Discusión

Investigaciones sobre microplásticos

En la Figura 1 se presentan número de publicaciones por año que se han realizado en temas de microplásticos desde el año 2014 al 2025, siendo los últimos tres años los que presentan una mayor frecuencia de publicaciones. Esto debido a que en los últimos años la investigación en la temática de contaminantes microplásticos ha tomado mayor relevancia, y se buscan métodos y técnicas de caracterización y muestreo (Sotomayor Mondragón & Vera Granada, 2020).

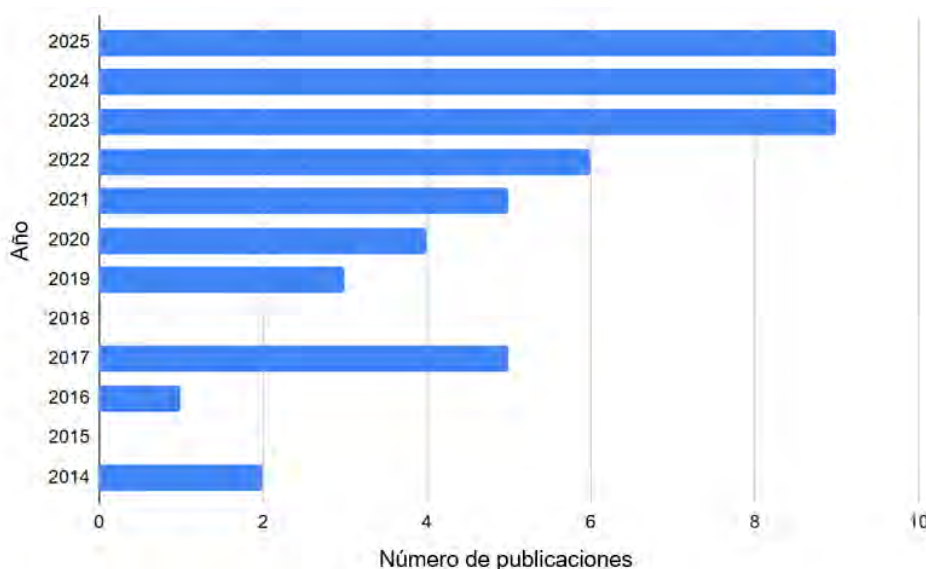


Figura 1. Número de publicaciones por año referente a microplásticos

Debido a la importancia de la identificación de microplásticos presentes en el ambiente, en la Figura 2 se reporta la distribución porcentual de investigaciones publicadas desde 2014 que hacen énfasis en la caracterización de estos contaminantes. Las técnicas más empleadas son microscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR por sus siglas en inglés), micro-Raman, tinción de microplásticos mediante colorantes orgánicos, y microscopia electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés). Estas técnicas son empleadas para identificar las características fisicoquímicas de los polímeros que se encuentran en forma de microplásticos en el ambiente, como su morfología, tamaño y estructura química. Por ejemplo (Sotil Suárez & Velásquez Hoyos, 2021) para evaluar la presencia de microplásticos en el interior de viviendas donde realizan un muestreo activo mediante bombas gravimétricas y emplean microscopia electrónica de barrido y espectroscopía infrarroja para su caracterización. (Ramaremis *et al.*, 2024) emplean la técnica de microespectroscopia Raman, en donde a partir de la tinción de microplásticos con colorantes orgánicos como rosa de bengala se logró identificar polietileno de alta densidad, poliuretano y tereftalato de polietileno.



Figura 2. Porcentaje de publicaciones por año sobre caracterización de microplásticos

Por otro lado, la Figura 3 reporta el número de publicaciones que aportan información sobre las afectaciones a la salud y al medio ambiente. En el año 2017, se presentó el mayor número de investigaciones en tema medioambiental por microplásticos. Es importante destacar que en 2019 se identifican formalmente a las investigaciones sobre afectaciones a la salud por presencia de estos contaminantes, ya que en 2018 es cuando surge el interés por el estudio de los efectos a la salud por presencia de microplásticos en el cuerpo humano (Libemann B. *et al.*, 2018).

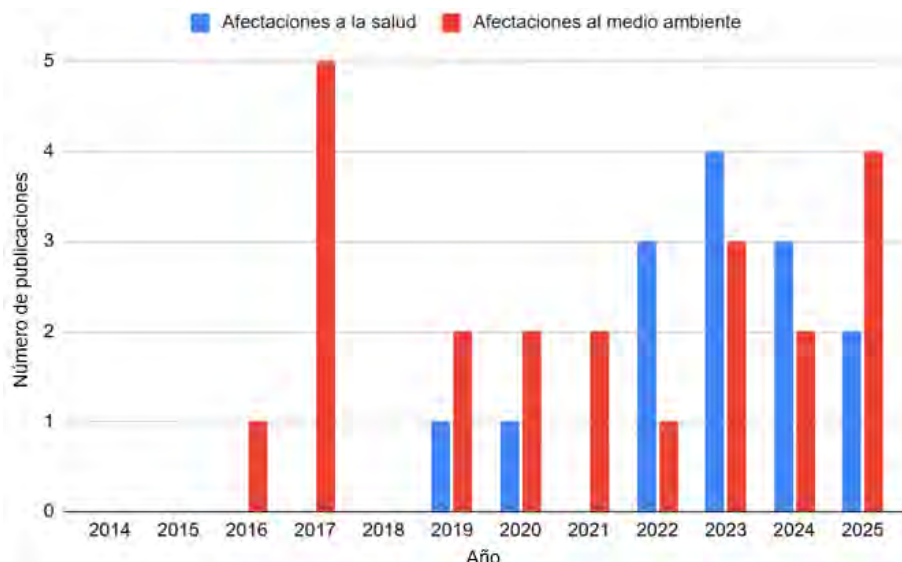


Figura 3. Número de publicaciones por año sobre afectaciones a la salud y al medioambiente causadas por microplásticos

Como lo muestra la Figura 3, el interés por el estudio de las afectaciones a la salud y medioambientales han permanecido, e incluso incrementado, con el paso del tiempo. Algunas afectaciones medioambientales que surgen a causa de la presencia de microplásticos es el cambio en la densidad aparente en el suelo, la capacidad de retención de agua y la materia orgánica del mismo (Khalid *et al.*, 2020). En el agua al encontrarse en contacto con los animales marinos provocan su ingesta lo que provoca la reducción de ingesta de alimentos, asfixia e intoxicación, además de la captación trófica que se propicia (Sánchez Ramírez, 2018). Aunado a ello los estudios por afectaciones a la salud humana revelan daños pulmonares, afectaciones neurológicas y dermatitis por contacto con la piel (Van Cauwenberghe & Janssen, 2014).

Es por ello la importancia de evaluar alternativas que permitan la mitigación de la contaminación a causa de microplásticos. Si bien la presencia de estos contaminantes se encuentra en el agua, suelo y aire, es en este ultimo en donde se enfoca la propuesta de separadores ciclónicos, documentados en esta revisión.

Investigaciones sobre separadores ciclónicos

Los separadores ciclónicos son tecnologías que permiten realizar un proceso de separación de material particulado que se encuentra suspendido en una corriente gaseosa, comúnmente empleado en emisiones por producción; sin embargo, este sistema puede ser empleado para la mitigación o captación de algún material específico. Es por ello que surge el interés de su implementación para la eliminación de microplásticos presentes en el aire.

En la Figura 4 se reporta el número de publicaciones relacionadas con separadores ciclónicos, en donde, los resultados en su mayoría provienen de simulación numérica empleando SolidWorks. Estos trabajos se basan en la variación de las geometrías de construcción del ciclón para así apreciar el cambio en la eficiencia de separación. Así mismo los estudios muestran la separación de material particulado, como fibras de fique, con un tamaño de partícula de 1 a 10 μm , emisiones de la combustión de vehículos automotores mayores a 2.5 μm , y materiales plásticos como PVC y PET, con densidades de flujo de 1380 kg/m^3 y del material de 1400 kg/m^3 (Kang *et al.*, 2024).

En los resultados de las simulaciones, se reportan eficiencias de separación superiores al 90% para partículas menores a 10 μm , y superiores al 85% en procesos de separación en pruebas experimentales con partículas menores a 200 μm . De igual forma, se indica la relación que guardan algunos factores con la eficiencia de separación, de modo que la eficiencia se ve incrementada cuando existe una diferencia de densidades entre la del flujo y la del material (Ratri Chowdhury *et al.*, 2024), cuando se emplea una geometría cónica en el ciclón separador (Kang *et al.*, 2024) y conforme al diámetro del material particulado (Chávez Sánchez *et al.*, 2018).

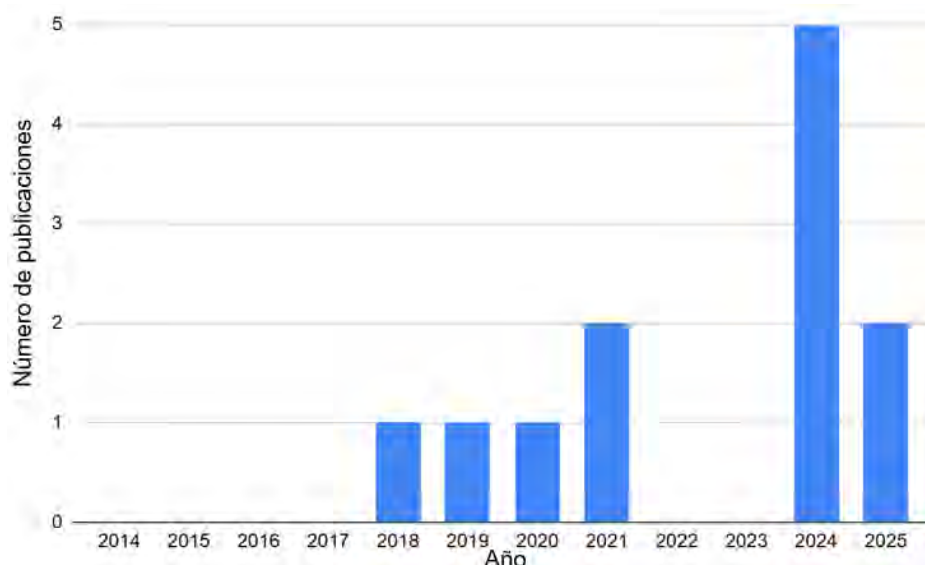


Figura 4. Número de publicaciones por año referente a separadores ciclónicos

Los separadores ciclónicos presentan, como ventaja, la ausencia de partes móviles, un bajo requerimiento de mantenimiento, y un funcionamiento simple. Sin embargo, estos equipos no son recomendables para materiales aglomerantes y abrasivos (Echeverri Londoño, 2006).

Análisis general de las investigaciones

Se realizó un análisis de la relación entre las investigaciones de acuerdo a la coautoría y las palabras clave, ya que, aunque los temas de microplásticos y de separadores ciclónicos son áreas diferentes, en ciertas aplicaciones presentan algunos puntos en común, como la importancia y afectaciones del material particulado suspendido en la atmósfera.

En la Figura 5 se presenta el diagrama de la relación entre coautores; para este diseño de diagrama se tomó un mínimo de documentos por autor, de 2 artículos. Por lo que, de los 68 artículos totales 53 presentaron coincidencias.

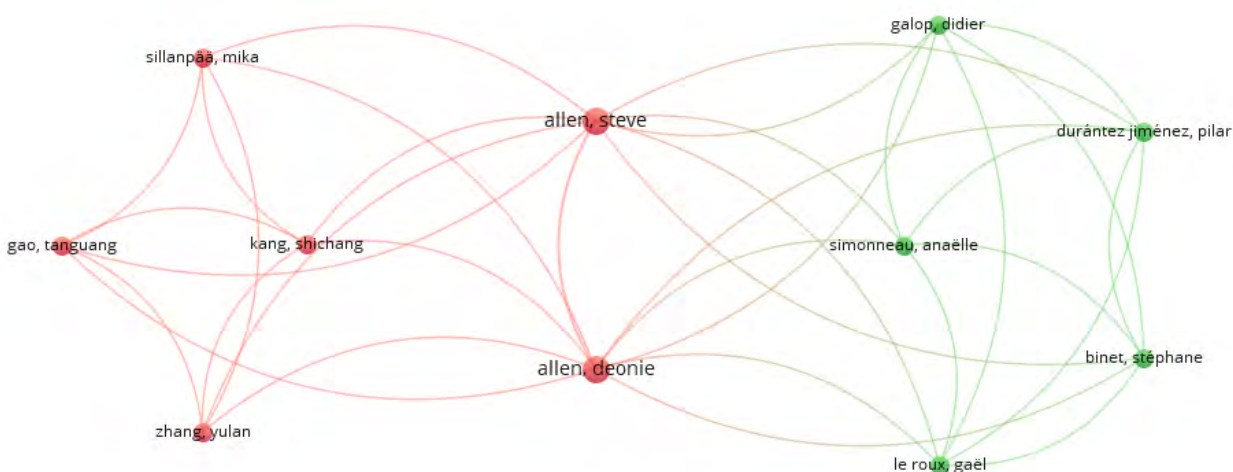


Figura 5. Diagrama de relación por coautoría

El diagrama muestra una red en donde cada nodo representa un autor, conforme sea mayor el tamaño del nodo mayor será el número de publicaciones, además las líneas interconectadas representan las colaboraciones entre autores. Logra observarse en la Figura 5 que Steve Allen es uno de los autores que presenta mayor densidad en coautoría, esta

referente a microplásticos en investigaciones como “Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment”, (Allen *et al.*, 2019) y “Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives” (Zhang *et al.*, 2020).

En la Figura 6 se observa la relación entre los artículos estudiados considerando las palabras clave, de las cuales se tomó un número mínimo de 3 en la frecuencia de su repetición. El tamaño del nodo de la palabra indica la frecuencia con la que aparece en las investigaciones, entre mayor sea el tamaño mayor frecuencia de uso tiene, las líneas representan con que otra palabra es vinculada en las investigaciones y los colores son clasificados de acuerdo al periodo de publicación asociado a la barra que se encuentra en la parte inferior. Puede observarse que la mayor ocurrencia se presenta en la palabra “microplastics”, seguida de “human health”, lo anterior se debe a que, aunque en una mayor parte las investigaciones contempladas son respecto a microplásticos, hay investigaciones de simulación, en donde se consideran los separadores ciclónicos para mitigación de dichas partículas (Kang *et al.*, 2024). Por otra parte, la afectación a la salud humana es mencionada no solo por microplásticos, sino también por material particulado, en general (Montijo-Valenzuela, 2021).

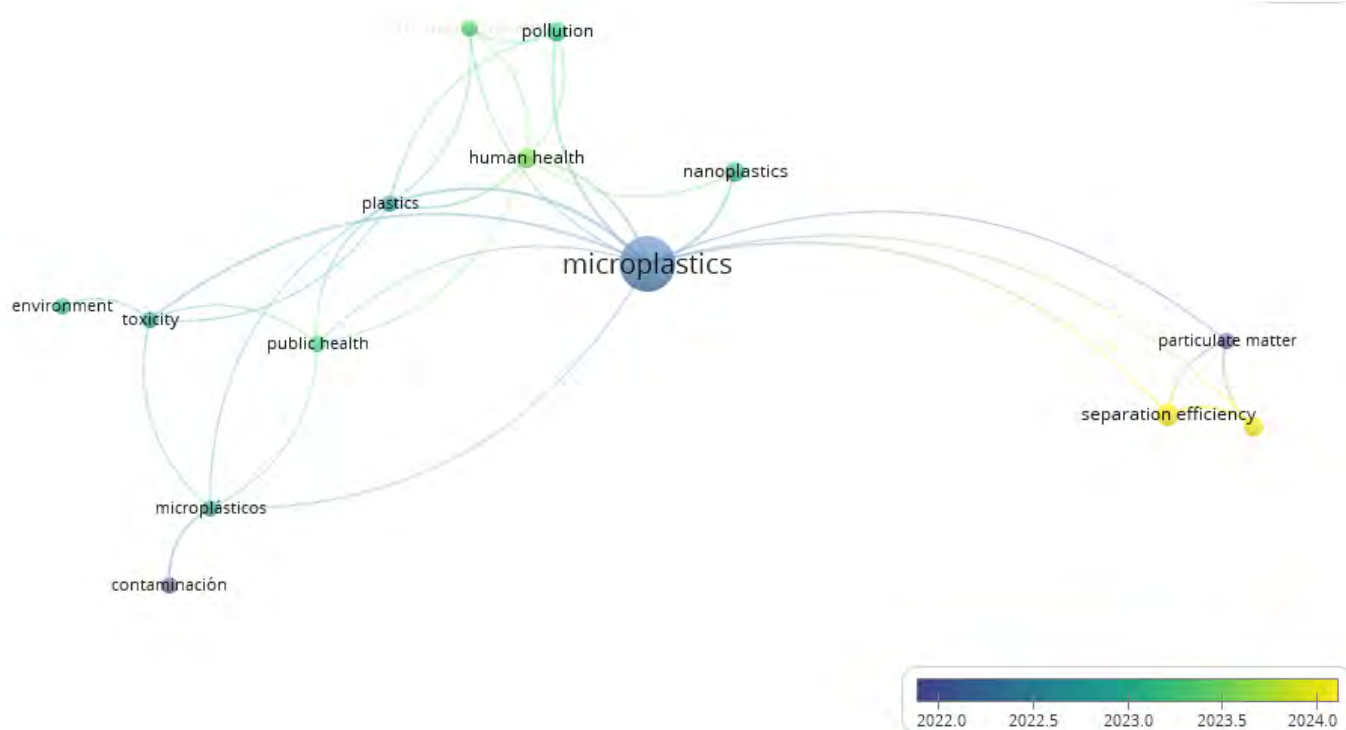


Figura 6. Diagrama de relación por palabras clave

La Figura 7 presenta la relación de tres datos de publicación: el año, la frecuencia y el país. Los tres países con mayor cantidad de publicaciones son: Estados Unidos, con 8 artículos, seguido de China, con 7 artículos, y México, con 6 publicaciones. Los años que tienen mayor número de publicaciones son del 2023 al 2025, lo cual demuestra que el tema es, actualmente, de gran importancia en la comunidad científica debido a todas las afectaciones medioambientales y a la salud humana que estos contaminantes causan y que anteriormente no habían sido contempladas para su estudio.

En la Figura 8 se presenta la relación entre los 68 documentos estudiados, para identificar qué porcentaje está conformado por artículos, revisiones (*reviews*) y tesis, observándose que predominan los artículos científicos, seguidos de los *reviews*; en la Tabla 1 se presentan los 10 documentos con mayor número de citas en orden creciente. Un mayor porcentaje de artículos implica tener investigaciones nuevas respecto a microplásticos, abordando diferentes temas de estudio, como el análisis de técnicas de caracterización, afectaciones medioambientales y a la salud y evaluaciones de procesos para mitigación de estos agentes contaminantes.

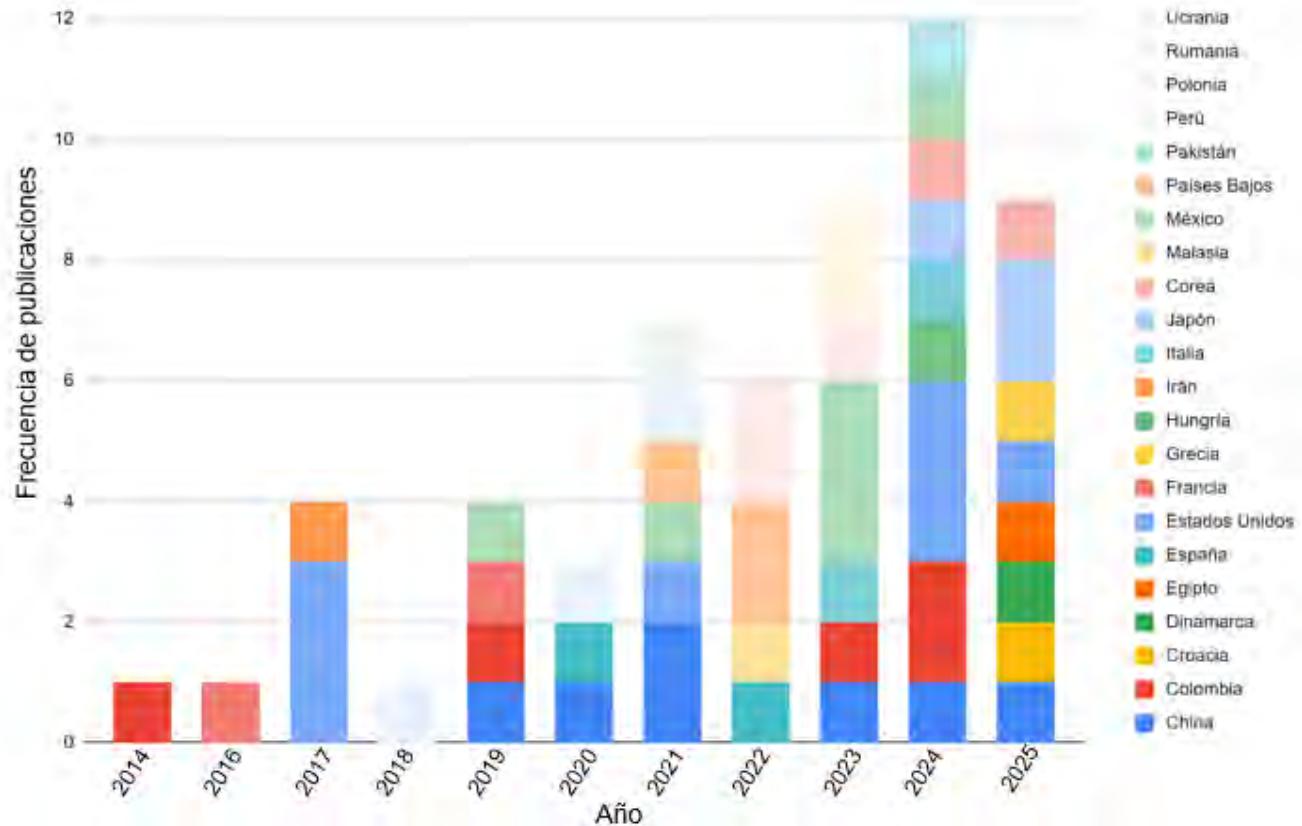


Figura 7. Frecuencia de publicaciones por año de cada país

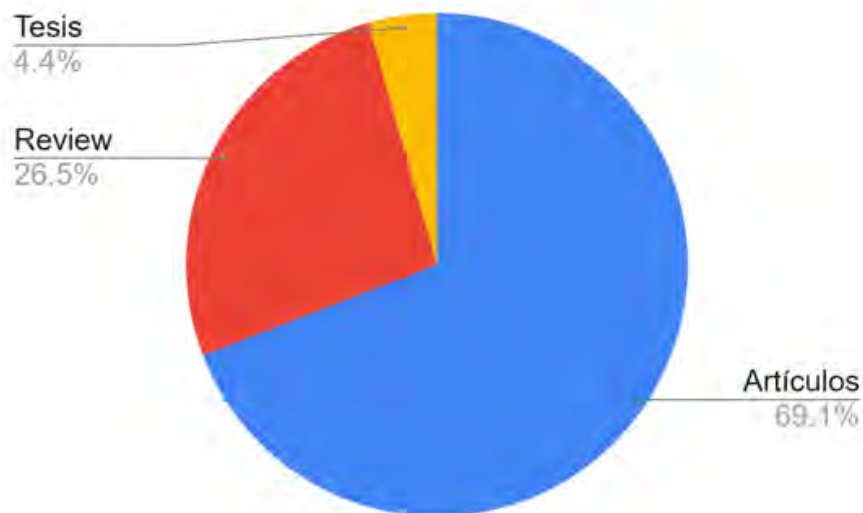


Figura 8. Relación de tipo de documento

Posteriormente se analiza el factor de impacto y el cuartil de las revistas, los cuales son una métrica que proporciona información sobre la frecuencia con la que son citados los artículos, siendo éste un indicador para la evaluación de una investigación, dicho análisis se presenta en la Figura 9. Se observa que 8 de las 10 revistas presentan un cuartil 1, y 4 de ellas un factor de impacto mayor a 10, lo que indica que tienen un índice alto de frecuencia de citación.

Tabla 1. Documentos con mayor número de citas

Tipo de documento	Nombre del documento	Número de citas	Referencias
Artículo	Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran	595	(Dehghani <i>et al.</i> , 2017)
Artículo	Production, use, and fate of all plastics ever made	629	(Geyer <i>et al.</i> , 2017)
Artículo	Microplastics as vectors for environmental contaminants: Exploring sorption, desorption, and transfer to biota	642	(Hartmann <i>et al.</i> , 2017)
Artículo	Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy	993	(Jenner <i>et al.</i> , 2022)
Artículo	Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives	1197	(Zhang <i>et al.</i> , 2020)
Review	Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment	1439	(Jan Kole <i>et al.</i> , 2017)
Artículo	Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment?	2246	(Dris <i>et al.</i> , 2016)
Artículo	Microplastics in bivalves cultured for human consumption	2402	(Van Cauwenberghe & Janssen, 2014)
Artículo	Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood	2737	(Leslie <i>et al.</i> , 2022)
Artículo	Production, use, and fate of all plastics ever made	17219	

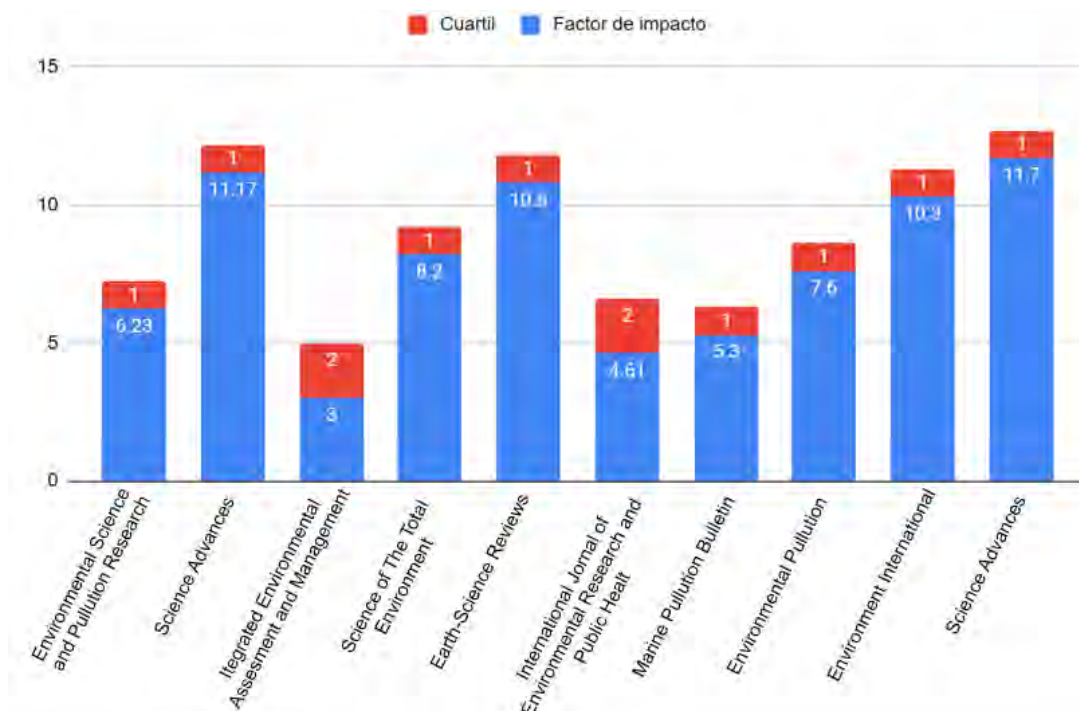


Figura 9. Factor de impacto y cuartil por revista

Conclusiones

El análisis bibliométrico permite identificar de manera grafica como el interés por el estudio de los microplásticos ha tomado una mayor relevancia a lo largo de los años, además de evaluar de que tipo de investigaciones está compuesto el análisis.

La estandarización de técnicas de caracterización de microplásticos son fundamentales para lograr analizar su comportamiento, composición y morfología.

Aunque existen técnicas actuales para la purificación del aire como el empleo de filtros, una de las ventajas de los separadores ciclónicos es que no requieren de partes móviles; además, tienen un bajo consumo energético, pero deben ser consideradas las características del material que desea separarse.

Los separadores ciclónicos pueden ser empleados en la separación de microplásticos presentes en el aire, debido a que dichas partículas cumplen con características que, se considera, logran aumentar la eficiencia de separación, tales como tamaño y densidad.

El análisis que se realiza segmentando 10 de las investigaciones estudiadas, se realiza con base en el mayor número de citas, lo cual le proporciona relevancia a las investigaciones y un buen fundamento para ser contempladas en el análisis, al observar que la mayoría se encuentran en un cuartil 1.

Agradecimientos y financiamiento: extendiendo mi agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el recurso económico para los estudios del programa de Maestría en Ingeniería, y al Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro, por el apoyo económico para participar en la convocatoria CIDSER 2025.

Bibliografía

- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., & Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12, 339–344. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>
- Alziny, N., Elgarhy, F. M., Mohamed, A. M., Shalaby, H. Y., Nounou, N., Soliman, O., & Abdelnaser, A. (2025). The impact of microplastics in food and drugs on human health: A review of the MENA region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(3), 380. <https://doi.org/10.3390/ijerph22030380>
- Amran, N. H., Zaid, S. S. M., Mokhtar, M. H., Manaf, L. A., & Othman, S. (2022). Exposure to microplastics during early developmental stage: Review of current evidence. *Toxics*, 10(10), 597. <https://doi.org/10.3390/toxics10100597>
- Athanasia Christou, Giechaskiel, B., Olofsson, U., & Grigoratos, T. (2025). Review of health effects of automotive brake and tyre wear particles. *Toxics*, 13(4), 301. <https://doi.org/10.3390/toxics13040301>
- Bahamondes Santos, J. L. (2008). *Diseño y construcción de un separador ciclónico para la industria naval*. Universidad Austral de Chile.
- Bai, Z., Wang, N., & Wang, M. (2021). Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112243>
- Briones Román, J. (2022). *Efectos en la salud de los microplásticos*. Universidad de Alcalá. <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/54225>
- Calvo Anglada, S., & Morales, E. B. (2020). *Detección y caracterización por tamaños de micro y nanoplasticos en muestras de interés ambiental*. Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/97987/files/TAZ-TFG-2020-3200.pdf>
- Carriera, F., Di Fiore, C., & Avino, P. (2024). Occurrence of microplastics in the atmosphere: An overview on sources, analytical challenges, and human health effects. *Atmosphere*, 15(7), 863. <https://doi.org/10.3390/atmos15070863>
- Castañeta, G., Gutiérrez, A. F., Nacaratte, F., & Manzano, C. A. (2020). Microplastics: A contaminant that grows in all environmental areas, its characteristics and possible risks to public health from exposure. *Revista Boliviana de Química*, 37(3). http://www.scielo.org.bo/pdf/rbq/v37n3/v37n3_a05.pdf
- Chávez Sánchez, Á. R., & Velásquez, S. (2018). Flujo de gases de combustión en el dimensionamiento de ciclones a adaptarse en tubos de escape para el control de partículas. *Ciencia y Tecnología*, 14(3), 63–74.
- Daoutakou, M., & Kintzios, S. (2025). Biosensors for micro- and nanoplastics detection: A review. *Chemosensors*, 13(4), 143. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13040143>
- Dehghani, S., Moore, F., & Akhbarizadeh, R. (2017). Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(25), 20360–20371. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9674-1>
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104(1–2), 290–293. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>
- Echeverri Londoño, C. A. (2006). Diseño óptimo de ciclones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 123–139. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75050911>
- El-Emam, M. A., Zhou, L., Shi, W., & Han, C. (2021). Performance evaluation of standard cyclone separators by using CFD–DEM simulation with realistic bio-particulate matter. *Powder Technology*, 385, 357–374. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.03.006>
- Fang, C., Awoyemi, O. S., Saianand, G., Xu, L., Niu, J., & Naidu, R. (2024). Characterising microplastics in indoor air: Insights from Raman imaging analysis of air filter samples. *Journal of Hazardous Materials*, 464, 132969. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132969>
- Fernández Morales, J., García-Morales, J. L., Suffo, M., Ani, A., Turk, D., & Bek, A. (2025). Macroissues with microplastics: A review on distribution, environmental impacts, pollutant interactions, toxicity, analytical methodology and mitigation strategies. *Applied Sciences*, 15(7), 4057. <https://doi.org/10.3390/app15074057>

- Fonseca, F., Pinto, F., Sánchez, K., & Vega, D. (2019). Diseño y construcción de un separador ciclónico tipo académico. *Revista Matices Tecnológicos*, 11. <https://core.ac.uk/reader/287169940>
- Gaylarde, C. C., Baptista Neto, J. A., & da Fonseca, E. M. (2024). Indoor airborne microplastics: Human health importance and effects of air filtration and turbulence. *Microplastics*, 3(4), 653–670. <https://doi.org/10.3390/microplastics3040040>
- Gaylarde, C., Monteiro, E., Fonseca, D., Enyoh, C. E., Devi, A., Maduka, T. O., Tyagi, L., Rana, S., Akuwudike, I. S., & Wang, Q. (2025). A review of materials for the removal of micro- and nanoplastics from different environments. *Micro*, 5(2), 17. <https://doi.org/10.3390/micro5020017>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Gómez-Méndez, L. D., Robles-Camargo, J. E., Vera-Bravo, R., Moncaleano-Niño, A. M., Devia Castillo, C. A., Ospina-Torres, R., Escobar-Cortés, Y., Camacho-Erazo, M., & Amarillo-Suárez, A. R. (2024). Characterization of microplastics in bees and their products in urban and rural areas of the Sabana de Bogotá, Colombia. *Microplastics*, 3(4), 589–598. <https://doi.org/10.3390/microplastics3040036>
- Han, I., Lee, C., Belchec, C., Shipper, A. G., & Wiens, K. E. (2024). Microplastics in urban ambient air: A rapid review of active sampling and analytical methods for human risk assessment. *Environments*, 11(11), 256. <https://doi.org/10.3390/environments11110256>
- Hartmann, N. B., Rist, S., Bodin, J., Jensen, L. H. S., Schmidt, S. N., Mayer, P., Meibom, A., & Baun, A. (2017). Microplastics as vectors for environmental contaminants: Exploring sorption, desorption, and transfer to biota. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(3), 488–493. <https://doi.org/10.1002/ieam.1904>
- Harusato, A., & Kato, M. (2025). Mechanisms of generation and ecological impacts of nano- and microplastics from artificial turf systems in sports facilities. *Environments*, 12(4), 109. <https://doi.org/10.3390/environments12040109>
- Hernández-Fernández, J., Puello-Polo, E., Castro-Suarez, J. R., Rocha-Santos, P., Mouneyrac, C., Da Silva, P. A., Tubić, A. T., & Hernández-Fernández, J. (2023). Characterization of the morphological and chemical profile of different families of microplastics in samples of breathable air. *Molecules*, 28(3), 1042. <https://doi.org/10.3390/molecules28031042>
- Jan Kole, P., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G. A. J., & Ragas, A. M. J. (2017). Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), 1265. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>
- Jarosz, K., Janus, R., Wądrzyk, M., Wilczyńska-Michalik, W., Natkański, P., & Michalik, M. (2022). Airborne microplastic in the atmospheric deposition and how to identify and quantify the threat: Semi-quantitative approach based on Kraków case study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12252. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912252>
- Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, R. T., Cowen, M., Tentzeris, V., & Sadofsky, L. R. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of the Total Environment*, 831, 154907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154907>
- Jesús Rivas Gutiérrez, M. del C. G. C., & Gómez Bañuelos, J. R. (2023). Los plásticos y el daño a la salud de los seres vivos y a los ecosistemas. *Biocenosis*, 34(1), 93–103. <https://doi.org/10.22458/rb.v34i1.4828>
- Kudzin, M. H., Piwowarska, D., Festinger, N., & Chruściel, J. J. (2023). Risks associated with the presence of polyvinyl chloride in the environment and methods for its disposal and utilization. *Materials*, 17(1), 173. <https://doi.org/10.3390/ma17010173>
- Lars Hildebrandt, T. Z., S. P., D. F., Gerdt, G., & D. P. (2021). Comparison and uncertainty evaluation of two centrifugal separators for microplastic sampling. *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125482. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125482>
- Leal, T. W., Tochetto, G., De Medeiros Lima, V., De Oliveira, P. V., Schossler, H. J., De Oliveira, S. R., & Júnior, S. H. D. A. (2025). Nanoplastics and microplastics in agricultural systems: Effects on plants and implications for human consumption. *Microplastics*, 4(2), 16. <https://doi.org/10.3390/microplastics4020016>
- Leslie, H. A., van Velzen, M. J. M., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Lamoree, M. H. (2022). Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, 163, 107199. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- Liebmann, B., Köppel, S., Königshofer, P., Buccics, T., Reiberger, T., & Schwabl, P. (2018). Assessment of microplastic concentrations in human stool: Final results of a prospective study. *Medical University of Vienna*, 28, 1. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.16638.02884>
- Lin, Y. D., Huang, P. H., Chen, Y. W., Hsieh, C. W., Tain, Y. L., Lee, B. H., Hou, C. Y., & Shih, M. K. (2023). Sources, degradation, ingestion and effects of microplastics on humans: A review. *Toxics*, 11(9), 747. <https://doi.org/10.3390/toxics11090747>
- Liu, C., Li, J., Zhang, Y., Wang, L., Deng, J., Gao, Y., Yu, L., Zhang, J., & Sun, H. (2019). Widespread distribution of PET and PC microplastics in dust in urban China and their estimated human exposure. *Environment International*, 128, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.024>
- Montijo-Valenzuela, E. E. (2021). Diseño y validación de un ciclón Stairmand destinado al filtrado parcial de material particulado. *Revista Tecnológica-Educativa Docentes 2.0*, 11(1), 80–88. <https://doi.org/10.37843/rted.v11i1.196>
- Navarro-Espinoza, S., Silva-Campa, E., Acosta-Elías, M., & Grijalva-Noriega, F. (2023). Micro(nano)plásticos en el medio ambiente: Una descripción de los efectos potenciales a la salud humana. *Epistemos (Sonora)*, 17(35), 68–74. <https://doi.org/10.36790/epistemos.v17i35.311>
- Noorimotlagh, Z., Hopke, P. K., & Mirzaee, S. A. (2024). A systematic review of airborne microplastics emissions as emerging contaminants in outdoor and indoor air environments. *Emerging Contaminants*, 10(4), 100372. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100372>
- Parvez, M. S., Czédli, H., Hoque, M. I., Rahman, M. M., Anwar, A., Uddin, A. H. M. M., Hasan, M. S., Bibi, D., Tóthmérész, B., Magura, T., & Simon, E. (2024). Accumulation of microplastics and potentially toxic elements in plant leaves along an urbanization gradient in Bangladesh. *Toxics*, 12(12), 848. <https://doi.org/10.3390/toxics12120848>
- Prasad, S., Bennett, A., & Triantafyllou, M. (2024). Characterization of Nile red-stained microplastics through fluorescence spectroscopy. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1403. <https://doi.org/10.3390/jmse12081403>
- Râpă, M., Darie-Niță, R. N., Matei, E., Predescu, A. M., Berbecaru, A. C., & Predescu, C. (2023). Insights into anthropogenic micro- and nanoplastic accumulation in drinking water sources and their potential effects on human health. *Polymers*, 15(11), 2425. <https://doi.org/10.3390/polym15112425>
- Ratri Chowdhury, M. M. B., S. R., S. C. B., & A. B. (2024). Analyzing the effect of the density of medium on efficiency of hydrocyclone separator in sorting of PVC and PET using CFD. *Results in Materials*, 21, 100497. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100497>
- Rojas, A. F., Aranzazu, L. M., Gaviria, G. H., & Carrero, J. I. (2014). Degradación térmica de polimetil metacrilato en múltiples extrusiones. *Ingeniería y Competitividad*, 16(2), 131–142. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291333276012>

- Rosso, B., Bravo, B., Gregoris, E., Barbante, C., Gambaro, A., & Corami, F. (2023). Quantification and chemical characterization of plastic additives and small microplastics (<100 µm) in highway road dust. *Toxics*, 11(11), 936. <https://doi.org/10.3390/toxics11110936>
- Rostampour, S., Jhang, S. S., Hsu, J. K., Cook, R., Li, Y., Fan, C., & Sung, L. P. (2025). Evaluating the environmental factors on microplastic generation: An accelerated weathering study. *Microplastics*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.3390/microplastics4010013>
- Sharaf Din, K., Khokhar, M. F., Butt, S. I., Qadir, A., & Younas, F. (2024). Exploration of microplastic concentration in indoor and outdoor air samples: Morphological, polymeric, and elemental analysis. *Science of the Total Environment*, 908, 168398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168398>
- Shim, Y., & Min, H. (2025). Identification and characterization of microplastics in human cervicovaginal lavage fluids using Raman spectroscopy: A preliminary study. *Life*, 15(3), 357. <https://doi.org/10.3390/life15030357>
- Sotomayor Mondragón, M., & Vera Granada, M. (2020). Revisión bibliográfica del estudio de los microplásticos presentes en el aire. *Repositorio Institucional UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/53192>
- Stabnikova, O., Stabnikov, V., Marinin, A., Klavins, M., Klavins, L., & Vaseashta, A. (2021). Microbial life on the surface of microplastics in natural waters. *Applied Sciences*, 11(24), 11692. <https://doi.org/10.3390/app112411692>
- Suárez, S., Hoyos, V. G., Olivera, C. A., & Alberto, C. (2021). Evaluación de la presencia de microplásticos en el aire del interior de viviendas, Carabayllo.
- Van Cauwenberghe, L., & Janssen, C. R. (2014). Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental Pollution*, 193, 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.010>
- Vázquez Rodríguez, G. A. (2019). Los microplásticos textiles (o la increíble historia de cómo tu suéter termina en el salero). *Ciencia*, 70(1), 56–63. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/70_1/PDF/Microplasticos.pdf
- Vighi, M., Bayo, J., Fernández-Piñas, F., Gago, J., Gómez, M., Hernández-Borges, J., Herrera, A., Landaburu, J., Muniategui-Lorenzo, S., Muñoz, A. R., Rico, A., Romera-Castillo, C., Viñas, L., & Rosal, R. (2021). Micro and nano-plastics in the environment: Research priorities for the near future. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 257, 163–218. https://doi.org/10.1007/398_2021_69
- Wang, B., Liu, H., Zhou, C., Huo, H., Dong, K., & Jiang, Y. (2020). Enhancing the collection efficiency of a gas cyclone with atomization and electrostatic charging. *Powder Technology*, 364, 562–571. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.062>
- Wang, Z., Jin, A., & Liu, M. (2025). Simulation and experimental design of an axial flow cyclone separator suitable for high-wind–sand environments. *Sustainability*, 17(8), 3355. <https://doi.org/10.3390/su17083355>
- Wojnowska-Baryła, I., Bernat, K., & Zaborowska, M. (2022). Plastic waste degradation in landfill conditions: The problem with microplastics, and their direct and indirect environmental effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13223. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013223>
- Zaragoza-Estrada, A., Estrada-Monje, A., & Zaragoza-Contreras, E. A. (2023). Microplásticos: Presencia y diseminación en el medio ambiente. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 88. <https://doi.org/10.33064/icycuaa2023884100>
- Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., & Sillanpää, M. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 203, 103118. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>
- Ziani, K., Ioniță-Mîndrican, C. B., Mititelu, M., Neacșu, S. M., Negrei, C., Moroșan, E., Drăgănescu, D., & Preda, O. T. (2023). Microplastics: A real global threat for environment and food safety: A state of the art review. *Nutrients*, 15(3), 617. <https://doi.org/10.3390/nu15030617>

Diseño de controlador de techo móvil para reducir la ganancia de calor y mejorar el confort

Jaziel Almeida de la Cruz-Jiménez ¹, Luis Enrique Angeles-Montero ^{2,*}, Iván Hernández-Pérez ³, Manuel Adolfo Custodio-Barragán ¹, Oscar Rafael Camacho-Cano ¹

¹ Estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México

² Técnico Académico del Laboratorio de Mecatrónica, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México

³ Profesor-Investigador de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco, México

* Autor de correspondencia: a: luis.angeles@ujat.mx; Tel.: (+52) 9932115433

Diseño de Procesos Sustentables (Control de Procesos)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 29 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.606>

Resumen: Se presenta un prototipo de techo móvil que ajusta su posición automáticamente según el nivel de radiación solar que recibe, optimizando la regulación energía en forma de calor recibida por las edificaciones. Se utilizaron tres programas de software en este trabajo: LabVIEW, Simulink de MATLAB y Autodesk Fusion 360 para elaborar el diseño y controlar el movimiento del techo móvil. El control realizado en LabVIEW crea instrumentos virtuales los cuales muestran el funcionamiento de los motores y coordina la señal analógica del sensor fotorresistor y la señal digital del sensor ultrasónico, para establecer los parámetros de funcionamiento lineal del mecanismo. Para el diseño del techo móvil, se implementó un sistema en el cual los dos eslabones están sujetos a una lámina, por lo que tienen la función de elevarse para que ésta se separe o acerque al edificio. Para ello, los dos brazos usan un sistema de tijera, que se acciona por medio de un sistema de biela manivela y accionados con motores para que esta se pueda elevar. Este diseño fue elaborado en el software de diseño Autodesk Fusion 360. Este techo móvil busca mejorar la eficiencia energética al adaptar su configuración según le convenga al edificio, reduciendo la ganancia de calor durante el día y favoreciendo la disipación térmica nocturna. Se obtuvo el tiempo de muestreo de adecuado para el proceso, las constantes del controlador PID de manera teórica, en software y finalmente de manera experimental se ajustaron los parámetros para obtener los más adecuados para el proceso en físico.

Palabras clave: Control PID, Sintonización Ziegler-Nichols, Regulación Térmica, Interfaz Humano Maquina, Confort

Movable ceiling controller design to reduce heat gain and improve comfort

Abstract: This paper presents a mobile roof that automatically adjusts its position in response to solar radiation, thereby optimizing the thermal regulation of buildings. Three software programs were used in this work: LabVIEW, MATLAB Simulink, and Autodesk Fusion 360 to develop the design and control the system's motion. The control implemented in LabVIEW creates virtual instruments that display the operation of the motors and coordinate the analog signal from the photoresistor sensor and the digital signal from the ultrasonic sensor to establish the linear operating parameters of the mechanism. For the design of the mobile roof, a system was implemented in which the two links are attached to a sheet, so they have the function of raising it so that it separates from the building. To achieve this, the two arms use a scissor system, which is actuated by a crank-connector system and driven by motors to elevate the sheet. This design was developed using Autodesk Fusion 360 software. This movable roof aims to enhance energy efficiency by adjusting its configuration to match solar conditions, thereby reducing heat gain during the day and promoting thermal dissipation at night. The appropriate sampling time for the process and the PID controller constants were determined theoretically and in software. Finally, the parameters were adjusted experimentally to obtain the most suitable parameters for the physical process.

Keywords: PID control, Ziegler-Nichols tuning, Thermal regulation, Human Machine Interface, Comfort

Introducción

Las edificaciones representan el sector que consume más energía, con alrededor de un tercio de toda la energía producida. Entonces, son responsables de un tercio de las emisiones de CO₂ en el planeta (IEA, 2024). En climas cálidos la distribución del consumo de energía en el hogar indica que el 55% de la electricidad es consumida por los equipos de aire acondicionado (CONUEE, 2020). Entonces, es necesario implementar medidas para reducir la ganancia de calor

durante el día y enfriar efectivamente los edificios durante la noche. De esta forma, se puede disminuir el consumo de electricidad destinada al confort térmico.

Todos los componentes de la envolvente contribuyen a las ganancias y pérdidas de calor de un edificio. Sin embargo, los techos de los edificios están expuestos a la radiación solar durante más horas que otros componentes. Se han desarrollado varias tecnologías para regular las ganancias de energía en los techos. Entre estas tecnologías se encuentran los techos ventilados que son una alternativa para reducir las ganancias de energía debido a dos características importantes. Primero, bloquean la irradiación solar directa, y segundo, evitan el sobrecalentamiento porque el flujo de aire entre las capas elimina una parte del calor absorbido por el techo. Aunque un techo ventilado tradicional es muy eficiente para reducir la ganancia de calor durante el día, cuando se oculta el sol, debido a su configuración, este tipo de techo presenta dificultades para emitir en calor en forma de radiación térmica. Entonces, le lleva más tiempo enfriarse que un techo convencional después de que se oculta el sol. Este problema se puede solucionar mediante la implementación de un techo con estructura móvil, que durante el día proporcione sombreado y durante la noche se retraiga para enfriarse radiativamente.

Un techo ventilado fijo puede reducir hasta el 59% de la ganancia de calor comparado con un techo convencional (Lima-Téllez *et al.*, 2022). Sin embargo, su desempeño térmico puede mejorarse si la lámina de sombreado pudiera cambiar su posición elevada a una posición en contacto con la envolvente para enfriar el edificio radiativamente durante la noche. En este proyecto se propone un techo ventilado móvil que ajusta automáticamente su posición de acuerdo con la presencia o ausencia de la radiación solar. Se presenta el diseño innovador de un techo móvil automático, así como sus componentes y las variables controladas para su funcionamiento. Dicho diseño contribuye a la mejora del confort y al ahorro de energía edificios ubicado en climas cálidos.

Una tecnología efectiva para reducir la transferencia de calor de los techos es el sombreado o bloqueo de la radiación solar. Los sistemas de sombreado pueden ser naturales como árboles o se pueden construir e instalar como un componente adicional. Los sistemas de sombreado contruidos, también conocidos como techos ventilados, normalmente consisten en estructuras metálicas con láminas que bloquean la incidencia de la radiación solar. En el trabajo de (Lima-Téllez *et al.*, 2022) se encontró que un techo ventilado redujo la ganancia de calor entre 55 y 59% comparado con un techo convencional. Sin embargo, en el mismo trabajo se muestra que en ausencia de radiación solar, el techo ventilado continúa transfiriendo calor al interior debido a que la lámina que sirve como sombreado durante el día, también evita que la radiación térmica pueda emitirse al ambiente exterior evitando que el edificio se pueda enfriar mediante el mecanismo de enfriamiento radiativo nocturno.

En ese sentido, la presente propuesta, un techo móvil que bloquea la radiación solar durante el día y se mantiene en contacto con el edificio durante la noche logrando optimizar el comportamiento térmico de un techo. Se diseñó un mecanismo para ajustar la posición de la estructura y también se construyó el sistema de control para que el techo móvil funcione de forma automática. Para el control se usó una función de transferencia el cual es una función lineal que trabaja con herramientas matemáticas como la transformada de Laplace y transformada Z.

Material es y Métodos

A continuación, se muestra la metodología usada para el diseño del controlador del techo móvil del prototipo. Se realizó el siguiente procedimiento: 1) Modelado del mecanismo en 3D, 2) Selección de sensores y actuadores, 3) Uso del método de sintonización de última ganancia, 4) Selección del periodo de muestreo y 5) Obtención de función de transferencia vía software e Implementación de interfaz para aplicar el controlador.

Modelado 3D del mecanismo del techo.

El software de modelado Autodesk Fusion 360 permite simular y predecir el movimiento de cualquier tipo de operación o proceso (Sánchez Márquez *et al.*, 2022). En la Figura 1 se muestra el mecanismo de tijera junto con el techo.

En la Figura 2 se muestra el mecanismo de tijera y el techo acoplado al prototipo de la casa. A los costados se muestran las bases que soportan a los motores que proporcionan el torque necesario para mover el techo secundario.

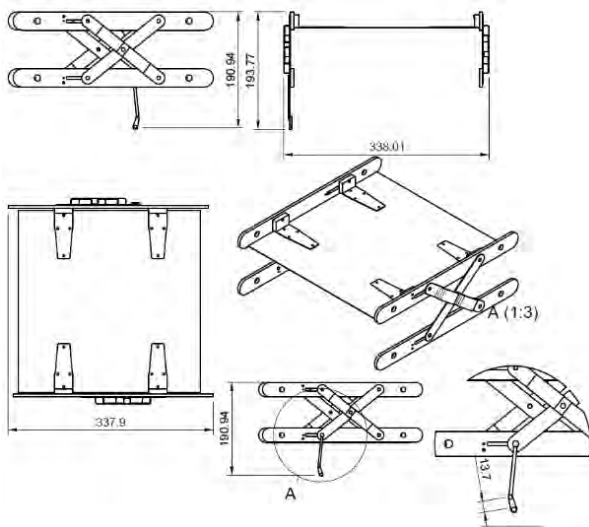


Figura 1. Mecanismo de tijera y techo

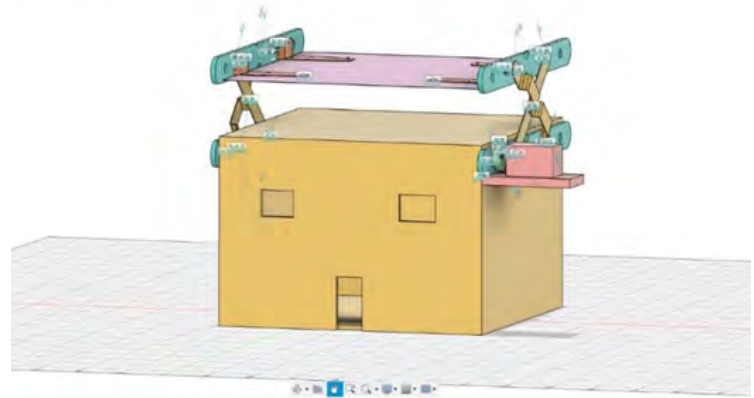


Figura 2. Mecanismo de tijera y techo

Sensores y actuadores

El sensor que se usó para detectar la iluminación fue una Fotoresistencia de 2 M Ω en la oscuridad y 50 K Ω con luz máxima (Bolton, 2013). La cual fue implementada en un arreglo de divisor de voltaje, para que al tener poca iluminación el voltaje de salida del circuito fuera menor y al incrementar la iluminación este se incrementa (Valencia & Londoño, 2022). El sensor usado para medir la distancia a la que se mueve el techo móvil con relación con el techo fijo fue el sensor ultrasónico HC-SR04. Se usaron dos Motores reductores de 12V a 62 RPM como actuadores, los cuales fueron controlados con un Puente H L298. Como placa de adquisición de datos se utilizó un Arduino UNO. En la Figura 3 se muestra el prototipo de vivienda con la estructura del techo móvil en la parte superior.



Figura 3. Implementación del Prototipo

Método de sintonización de última ganancia.

Para realizar la sintonización del controlador PID, se utilizó el primer método Ziegler-Nichols (Bolton, 2001; Ogata, 2010; Patel, 2020). Este método transforma una señal tipo escalón unitario en una señal experimental de salida para controlar el ascenso y descenso de la estructura del techo.

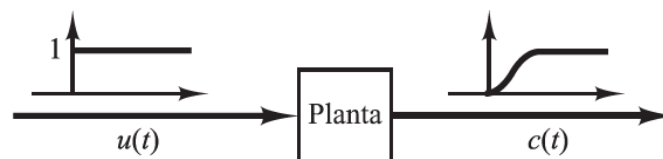


Figura 4. Respuesta de la planta a una entrada escalón unitario (Ogata, 2010)

La forma de la gráfica de la respuesta a un escalón unitario puede tener forma de S así como se muestra en la Figura 5. Esto es posible si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados (Ogata, 2010).

La grafica con forma de S tiene dos parámetros importantes: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . Los parámetros L y T se obtienen dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la gráfica, en la cual se debe determinar la intersección de la recta tangente en eje del tiempo y con la línea K (Figura 5). La función de transferencia que se obtiene es de primer orden la cual tiene un retardo como se muestra en la Ecuación 1 (Ogata, 2010).

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (1)$$

De acuerdo con el método de sintonización, los valores de K_p , T_i y T_d se muestran en la Tabla 1. La función de transferencia del controlador PID se muestra en la Ecuación 2 (Ogata, 2010).

Tabla 1. Regla de sintonización del controlador (Ogata, 2010)

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9 T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2 T/L$	$2L$	$0.5L$

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (2)$$

Por lo tanto, al ingresar los datos en un formato Excel obtenemos una gráfica de manera experimental tipo S escalonado como se muestra en la Figura 6. Aplicando el método anteriormente descrito se obtuvo la siguiente grafica de manera experimental Figura 6. En la cual se puede notar que $L = 0.6$ segundo y $T = 3.0$ segundos. Por lo cual para los valores de $K_p=6$, $K_i=5$ y $K_d=1.8$.

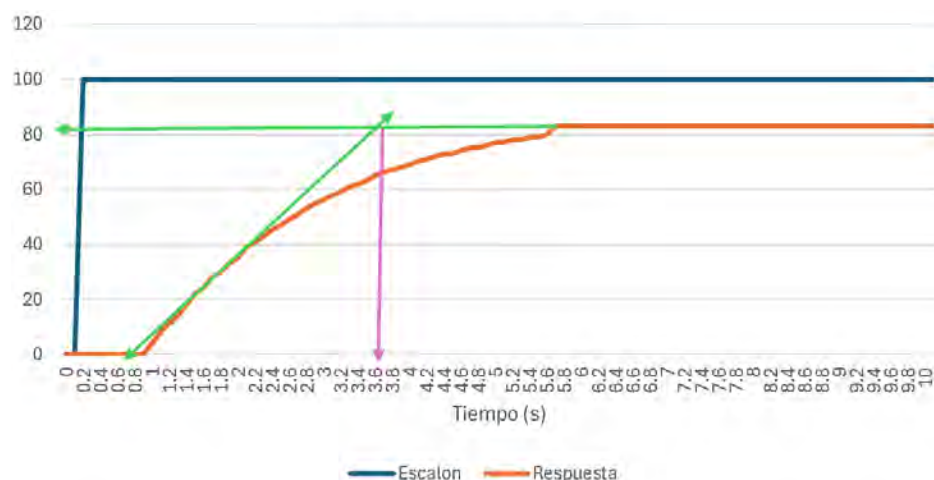


Figura 6. Grafica de la respuesta experimental a entrada escalón

Periodo de muestreo

El periodo de muestreo que se debe usar en el controlador debe ser adecuado, ya que, si el periodo de muestreo es muy lento, el software LabView para la adquisición de datos no podrá captar la información de una planta con cambios

rápidos; esto permite tomar los datos del proceso que necesitamos de manera precisa, sin generar datos erróneos o que falten para obtener una lectura de la señal que se desea controlar.

De acuerdo (Bolton, 2001), al utilizar el método de sintonización de curva de reacción del proceso se puede tomar como periodo de muestreo entre $0.05L$ y $0.3L$, en el cual L es el tiempo muerto. Tomando en cuenta estos criterios se puede seleccionar un tiempo entre 0.03 s y 0.18 s. Se selecciona un tiempo de muestreo de 0.15 s debido a la baja velocidad con la que se capturan los datos permitiendo obtener una lectura con mayor precisión y fineza de la señal.

Obtención de función de transferencia vía software

Se utiliza el software Matlab y su paquetería simulink para sintonizar el controlador PID, el cual permite calcular la función de transferencia (Jiménez *et al.*, 2010). Dicha función es obtenida usando la transformada de Laplace, de acuerdo con el tiempo de muestreo utilizado durante la adquisición de datos del comportamiento del proceso (ecuación 3).

$$G_p(s) = e^{-1.15s} \left(\frac{0.854}{2.748s + 1} \right) \quad (3)$$

Al trabajar con Arduino se utiliza un control digital, por lo tanto, es necesario aplicar la transformada z en la función de transferencia tal y como se muestra en la ecuación 4.

$$G_p(z) = z^{-8} \left(\frac{0.01396z + 0.03141}{z - 0.9469} \right) \quad (4)$$

Esta ecuación permite crear el diagrama de bloques que se utiliza para el proceso de control del techo móvil, dicho diagrama muestra la discretización del PID, el tiempo de respuesta y la transformada Z . En la Figura 7 Se muestra el diagrama de bloques de lazo cerrado del proceso.

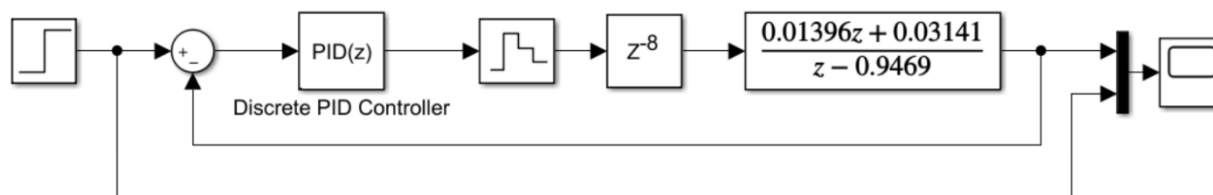


Figura 7. Diagrama de bloques de lazo cerrado

Es importante mencionar que al aplicar la auto-sintonización del diagrama de bloques de lazo cerrado en simulink permite encontrar los valores del proporcional (k_p), integral (k_i) y derivativo (k_d). Se obtuvieron los siguientes resultados: $K_p=2.465$, $K_i=0.57298$ y $K_d=0.61006$. En la Figura 8 se muestra gráfica de la respuesta (verde) con el controlador PID, el cual es sometido a una entrada escalón (rojo). Se puede notar que la respuesta tarda en estabilizarse a los 14 segundos y tiene un sobre paso de un 10%, lo que indica que los valores del controlador son adecuados.

Implementación de interfaz para aplicar el controlador

Para realizar la programación se usó el software LabVIEW el cual es un programa que permite diseñar

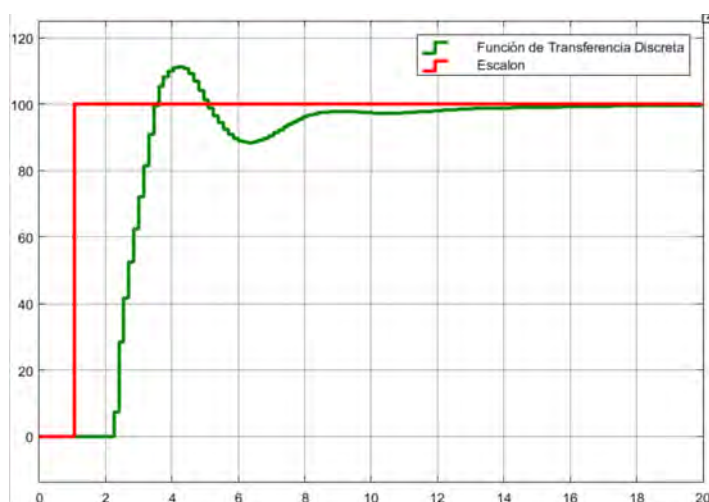


Figura 8. Respuesta de la planta con PID a una entrada escalón

diferentes tipos de control mediante las comunicaciones seriales con Arduino, puede realizar las interacciones de la Human Machine Instrument (HMI) (Schwartz & Manickum, 2015) mostrando parcialmente la programación por bloques para la activación de los actuadores de manera sincronizada y estableciendo parámetros que permitan controlar el proceso de manera eficiente. Por ello es posible que los valores del controlador PID sean ajustados para tener un mejor desempeño del proceso con los valores $K_p=1$, $K_i=0.33$ y $K_d=0.0$.

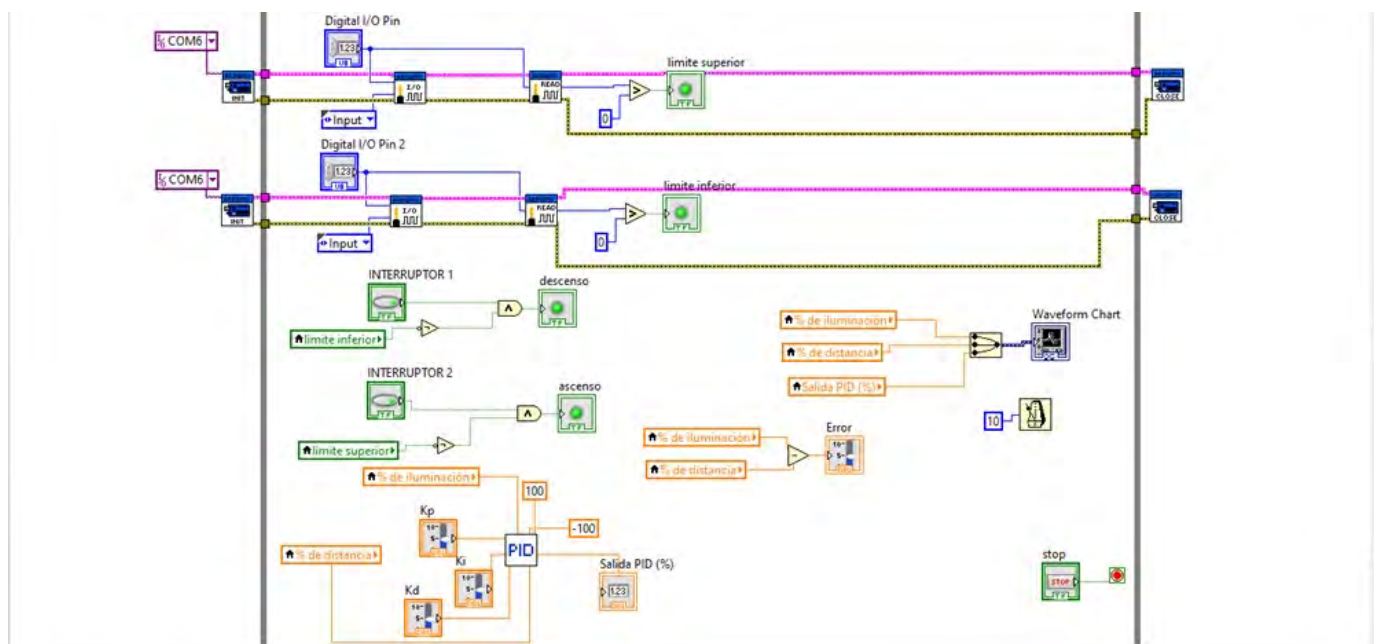


Figura 9. Respuesta de la planta con PID a una entrada escalón

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo demuestran que el mecanismo biela-manivela diseñado inicialmente cumple con la función de generar un movimiento lineal en ambas posiciones de la lámina del techo móvil. Este comportamiento valida los principios básicos de diseño y la selección inicial de componentes.

En la Figura 10 se muestra la interfase visual del programa diseñado por paqueterías de LabVIEW, el cual cuando el sensor detecta la iluminación del sol, el fondo del panel se muestra claro, lo que indica que es de día. El controlador acciona los motores para que el techo móvil se mueva hacia arriba, para así genera una sombra al techo.



Figura 10. Panel frontal de programación de día

En la Figura 11 se muestra el panel frontal cuando el sensor no detecta radiación solar, el fondo del panel se oscurece simulando la noche. El controlador acciona los motores para que el techo móvil se desplace hacia abajo, manteniendo la lámina-en contacto con la loza y este funcione como disipador de calor en la loza.



Figura 11. Panel frontal de programación de noche

El accionamiento del sistema demostró que es relativamente rápido, lo cual puede comprometer tanto la eficiencia operativa como la estabilidad del proceso. El análisis del funcionamiento del mecanismo reveló que la velocidad del movimiento es un factor crítico que afecta la movilidad y el control del sistema.

En la Tabla 2 se muestran los resultados importantes de los parámetros del controlador. Se establece que el tiempo de muestreo óptimo debe ser de 0.15 segundos, se puede notar que los valores del controlador, teórico, software y ajustados tienen una variación significativa. Lo cual indica que las aproximaciones teóricas y mediante software nos permiten tener un punto de partida, para poder ajustarlo de acuerdo con las condiciones en las que se encuentre el proceso. Para mejorar el sistema de control se puede implementar otro tipo de control como lo puede ser modos deslizantes, redes neuronales, etc. De igual manera se puede realizar medición de temperatura del interior y del exterior en diferentes condiciones ambientales.

Tabla 2. Resultados del controlador PID a un tiempo de muestreo de 0.15 segundos

Tipo de controlador	K_p	K_i	K_d
Teórico	6	5	1.8
Software	2.465	0.57298	0.61006
Ajustado	1	0.33	0

Conclusiones

De acuerdo a lo presentado a lo largo de este trabajo se puede concluir que esta propuesta de diseño innovador para techos ventilados no solo mejora la funcionalidad y eficiencia para reducir la ganancia de calor en edificaciones, sino que también optimiza de manera automatizada el accionamiento del mecanismo de biela-manivela pensado como diseño inicial, así como la utilización de componentes electrónicos, como lo son el light dependent resistor (LDR) para los datos de variable de entrada de radiación solar, motores de corriente directa que ayuden al sistema a generar un movimiento lineal en ambas posiciones del techo y controladores como Arduino y drivers puente H L298N para el control de los motores de corriente directa. Para este tipo de proyectos se implementó un Human Machine Interface (HMI) para tener una visualización e interacción humano-máquina. se usaron tres softwares de programación para lograr el objetivo deseado del proyecto (LabVIEW, Matlab y Arduino uno). Se establecieron sistemas de control de lazo cerrado por medio de métodos como el de Ziegler-Nichols el cual calcula el tiempo de retardo del accionamiento del

mecanismo por medio de la transformada Z para controlar el ascenso y descenso del techo, todo esto usando comunicación de puertos seriales con Arduino. Finalmente se destaca que este diseño refuerza la importancia de la optimización continua en proyectos de diseño y automatización mecánica.

Agradecimientos y financiamiento: Al Dr. Luis Manuel López Manrique y al Laboratorio de Mecatrónica por el aporte de componentes electrónicos, instrumentos de medición y herramientas que se usaron a lo largo de este trabajo.

Bibliografía

- Bolton, W. (2001). *Ingeniería de control* (Segunda). Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C. V., México.
- Bolton, W. (2013). *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario* (5a edición). Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C. V., México.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2020). *Cuadernos de la CONUEE número 5. Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México. Cuadernos de la CONUEE*, 5. México.
- International Energy Agency (IEA). (2024). *More efficient and flexible buildings are key to clean energy transitions*. IEA. <https://www.iea.org/commentaries/more-efficient-and-flexible-buildings-are-key-to-clean-energy-transitions>
- Jiménez, L. M., Puerto, R., Reinoso, Ó., Fernández, C., & Ñeco, R. (2010). RECOLAB: Laboratorio remoto de control utilizando Matlab y Simulink. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2(2), 64–72. <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/8063>
- Lima-Téllez, T., Chávez, Y., Hernández-López, I., Xamán, J., & Hernández-Pérez, I. (2022). Annual thermal evaluation of a ventilated roof under warm weather conditions of Mexico. *Energy*, 246, 123412. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123412>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5th ed.). Pearson Educación. <https://doi.org/10.29057/ess.v5i10.3323>
- Patel, V. V. (2020). Ziegler-Nichols tuning method. *Resonance*, 25(10), 1385–1397. <https://doi.org/10.1007/s12045-020-1058-z>
- Sánchez Márquez, J. A., Sánchez Ramírez, T. A., Gasca González, A., Martínez Jiménez, L. S., Guía Núñez, N. K., Ruelas Rodríguez, M., & Ramírez Sánchez, M. F. (2022). Optimización del proceso de diseño de prototipos mediante simulaciones de forma en 3D empleando Autodesk Fusión 360. *Jóvenes en la Ciencia*, 16, 1–11. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3568>
- Schwartz, M., & Manickum, O. (2015). Programming Arduino with LabVIEW. In *LabVIEW Arduino*.
- Valencia, M. V., & Londoño, A. A. (2022). *Introducción a la adquisición y acondicionamiento de señales*. Instituto Tecnológico Metropolitano—ITM, Colombia. <https://hdl.handle.net/20.500.12622/5649>

Parámetros de la función de Weibull para la región sur de Tamaulipas, México

Alicia Yarely Castillo-Medellín ¹, Jorge Ramírez-Muñoz ², Valaur Ekbalam Marquez-Baños ³, y Román Guadarrama-Pérez ^{4,*}

¹ Estudiante de Ingeniería Química, TecNM/Instituto Tecnológico Superior de El Mante, Ciudad Mante, Tamaulipas, C.P. 89930, México

² Departamento de energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, CDMX, Ciudad de México, C.P. 02128, México

³ Área de Química, Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230, México

⁴ Departamento de Ingeniería Química, TecNM/Instituto Tecnológico Superior de El Mante, Ciudad Mante, Tamaulipas, C.P. 89930, México

* Autor de correspondencia: rguadarrama@itsmante.edu.mx

Energías Renovables (Energía eólica)

Recibido: 23 de junio de 2025

Aceptado: 15 de agosto de 2025

Publicado: 29 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.555>

Resumen: En el estado de Tamaulipas, México, se han identificado poblaciones consideradas con pobreza energética. Por lo tanto, existe la necesidad de implementar estrategias que permitan que estas poblaciones cuenten con energía eléctrica. En este sentido, la instalación de aerogeneradores tipo Savonius puede ser una alternativa viable. Uno de los criterios más importantes para determinar la viabilidad en el uso de un aerogenerador es la velocidad del viento en la zona de interés. Una manera de caracterizar la velocidad del viento es mediante la función de distribución de Weibull. En esta función están presentes dos parámetros a determinar, los cuales son el factor de forma y el factor de escala. Con la finalidad de determinar la viabilidad, en cuanto a velocidad de viento, para la instalación de aerogeneradores en zonas con pobreza energética, en este trabajo se hace un estudio en tres municipios del sur Tamaulipas, estos son: Ciudad Victoria, Ciudad Mante y Tampico. A partir de datos proporcionados por CONAGUA, se determinó la velocidad promedio del viento mediante el cálculo de los parámetros de la función de Weibull. Los resultados obtenidos muestran que en las tres ciudades estudiadas se encuentran velocidades del viento adecuadas para la puesta en marcha de turbinas tipo Savonius.

Palabras clave: Potencial eólico, Energía eólica, Factor de escala, Factor de forma, Función de frecuencia

Weibull function parameters for the southern region of Tamaulipas, Mexico

Abstract: In the state of Tamaulipas, Mexico, communities have been identified as experiencing energy poverty. Therefore, there is a need to implement strategies that allow these ensure these communities have access to electricity. In this sense, the installation of Savonius-type wind turbines may be a viable alternative. One of the most important criteria for determining the viability of using a wind turbine is the wind velocity in the area of interest. One way to characterize wind velocity is through the Weibull distribution function. This function includes two parameters to be determined: the shape factor and the scale factor. With the aim of determining the feasibility, in terms of wind speed, for the installation of wind turbines in areas experiencing energy poverty, this study examines three municipalities in southern Tamaulipas: Ciudad Victoria, Ciudad Mante, and Tampico. Using data provided by CONAGUA, the average wind velocity was determined by calculating the parameters of the Weibull function. The results show that all three cities have the appropriate velocity for the operation of Savonius-type turbines.

Keywords: Wind potential, Wind power, Scale factor, Shape factor, Frequency function

Introducción

Hoy en día el uso de energía eléctrica es clave para el desarrollo humano tanto a nivel sociedad como individual. Por ejemplo, como sociedad se requiere de energía para proveer servicios esenciales como agua potable, drenaje, salud, educación, iluminación y transporte (Santillán, 2021). Por otro lado, el uso de energía individual suele asociarse al consumo energético en el hogar, esto debido a que el hogar es considerado el espacio donde las personas perciben un estado de bienestar y confort, originado por servicios como cocina, ventilación, iluminación y tecnología, lo cual mejora la productividad del ser humano (Dorado & Núñez, 2021).

Aunque se tiene conciencia sobre la necesidad energética básica de la población mundial, existen hogares con dificultades para acceder al servicio de energía, ya sea por el costo o por la disponibilidad del servicio (Dorado & Núñez, 2021). Con la finalidad de brindar energía a toda la población, los miembros de la Organización de la Naciones Unidas (ONU) aprobaron en 2015 el objetivo 7 de la Agenda 2030 Para el desarrollo sostenible (ONU, 2015). Derivado de este compromiso, en 2021 la ONU informa que el 13% de la población mundial no tenía acceso a energía eléctrica y para el 2023 esta cifra disminuyó a 9%, lo que representa 675 millones de personas (ONU, 2023).

En México, de acuerdo con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2020, el 1% de la población nacional no cuenta con electricidad en sus hogares o está no cubre en su totalidad sus necesidades básicas (cocción de alimentos, refrigeración, entretenimiento, iluminación y calentamiento de agua), de tal manera que aproximadamente 1.2 millones de personas distribuidas a lo largo del país son consideradas en pobreza energética (INEGI, 2020). Con la finalidad de suministrar de energía eléctrica a comunidades con pobreza energética, la Secretaría de Energía (SENER) clasifica estas localidades en dos sectores: (1) Aquellas que pueden ser atendidas mediante la extensión de líneas de distribución, y (2) localidades que se encuentran alejadas o inaccesibles a una línea de distribución, denominadas localidades aisladas (SENER, 2017). En particular, en el estado de Tamaulipas, la SENER ha identificado al norte; los municipios de Méndez y Miguel Alemán, y al sur; los municipios de Gómez Farías, González, Llera y Ocampo (SENER, 2022).

De acuerdo con la Comisión de Energía de Tamaulipas (CETAM), el Estado de Tamaulipas se encuentra en una ubicación geográfica privilegiada, ya que cuenta con diferentes fuentes de energía renovable, es decir, solar, eólica y oceánica. Respecto a la fuente de energía eólica, a 120 metros de altura, la mayoría del territorio cuenta con un potencial eólico superior a $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y en regiones cercanas a la costa central y norte se tiene un potencial mayor a $700 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (CETAM, 2021). En este sentido, en Tamaulipas, se encuentran operando 13 parques eólicos, de tal manera que es el segundo estado con mayor producción de energía limpia (Energy, 2024). Si bien, estos parques se encuentran distribuidos a lo largo del estado, por ejemplo, al norte en el municipio de Reynosa, en el centro en el municipio de Güemes y al sur en el municipio de Llera, las condiciones geográficas de las localidades aisladas no permiten la conexión a las subestaciones eléctricas instaladas. Por tal motivo, surge la necesidad de buscar una estrategia para atender esta problemática.

En este sentido, se propone utilizar el potencial eólico de las comunidades consideradas aisladas mediante pequeñas turbinas, por ejemplo, tipo Savonius, las cuales pueden operar a menor altura que las turbinas instaladas en parques eólicos y en un intervalo de velocidad del viento entre 0.15 y $5.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Dewan *et al.*, 2023). Con este fin, el objetivo de este trabajo es dar a conocer la velocidad del viento en la zona sur del estado de Tamaulipas, considerando que las variaciones en la velocidad pueden ser representadas mediante la función de distribución de Weibull.

Materiales y Métodos

Los datos de velocidad del viento fueron obtenidos de la información proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, 2025) de las estaciones más cercanas a los municipios de Gómez Farías, González, Llera y Ocampo, es decir, las estaciones de Cd. Victoria, Cd. Mante y Tampico. Los datos corresponden a los meses de marzo, abril y mayo de 2025.

Función de distribución acumulada de Weibull

La función de distribución de Weibull es frecuentemente utilizada analizar el potencial del eólico (Yancachajlla Tito & Vilca Huayta, 2022). Esta función indica la fracción de tiempo durante la cual el viento tiene una cierta velocidad (u) y puede ser expresada como (Serban *et al.*, 2020):

$$f(u) = \begin{cases} \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} & u > 0 \\ 0 & u < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

donde k es el factor de forma de Weibull y c es el factor de escala. k indica el grado de dispersión de la velocidad del viento, por lo que un factor de forma pequeño indica una distribución de la velocidad del viento relativamente grande alrededor de la velocidad promedio, mientras que un factor de forma más grande indica una distribución de la velocidad del viento relativamente pequeña alrededor del promedio. Mientras que c indica la velocidad promedio del viento.

La función de distribución acumulada $F(u)$ se obtiene integrando la función de distribución [ecuación (1)] y nos da la fracción de tiempo durante la cual la velocidad del viento es igual o menor que la velocidad promedio. $F(u)$ puede ser escrita como (Serban *et al.*, 2020):

$$F(u) = \int_0^u \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} du = 1 - e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad (2)$$

Cálculo de k y c

Para determinar los parámetros k y c de la función de distribución de Weibull se linealizó la ecuación (2):

$$F(u) - 1 = e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k}, \quad (3)$$

$$\text{Ln}[F(u) - 1] = \text{Ln}\left[e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k}\right], \quad (4)$$

$$\text{Ln}[F(u) - 1] = -\left(\frac{u}{c}\right)^k, \quad (5)$$

$$\text{Ln}\{-\text{Ln}[F(u) - 1]\} = \text{Ln}\left[\left(\frac{u}{c}\right)^k\right], \quad (6)$$

$$\text{Ln}\{-\text{Ln}[F(u) - 1]\} = k \text{Ln}\left(\frac{u}{c}\right), \quad (7)$$

$$\text{Ln}\{-\text{Ln}[F(u) - 1]\} = k \text{Ln}(u) - k \text{Ln}(c). \quad (8)$$

De tal manera que los datos de velocidad del viento fueron ajustados mediante la ecuación (8), en la cual, la pendiente representa el valor de k y de la ordenada al origen puede ser obtenido el valor de c .

Resultados y Discusión

En la Figura 1 se presentan las distribuciones de la velocidad del viento. En las Figuras 1-a), b) y c) se muestran los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas de CONAGUA, así como, como la representación de estos mediante la función de distribución de Weibull para Cd. Victoria, Cd. Mante y Tampico, respectivamente. En estas Figuras se puede observar que la función de distribución de Weibull describe bastante bien el comportamiento de la velocidad del viento en las zonas evaluadas.

En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos para los parámetros de la función de distribución de Weibull, es decir el factor de forma (k) y el factor de escala (c). Se puede observar que k tiene un valor muy similar en las tres diferentes zonas de estudio. Los valores obtenidos para el parámetro de forma k , cercanos a 2.2 en las tres estaciones analizadas, indican que la dispersión de la velocidad del viento en estas zonas es moderada y relativamente uniforme. Por otro lado, el parámetro de escala c , que representa la velocidad promedio del viento, varía entre 4.9 y 6.7 m·s⁻¹, siendo la estación de Tampico la que presenta el mayor potencial eólico, seguida por Cd. Mante y Cd. Victoria.

Tabla 1. Valores de los parámetros de la función de distribución de Weibull

Zona	k	c
Cd. Victoria	2.2	4.9
Cd. Mante	2.2	5.3
Tampico	2.3	6.7

Autores como Martheyn-Lizarazo y Rubio-Ramírez (2017) mencionan que las turbinas eólicas tipo Savonius pueden operar a partir de una velocidad promedio de viento de 3 m·s⁻¹ e incluso Sarma *et al.* (2014) reporta, para una turbina tipo Savonius con área de barrido de 0.6 m², una generación de 2.4 W al operar con una velocidad promedio de viento de 0.9 m·s⁻¹. Por lo tanto, de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, las zonas Cd. Victoria, Cd. Mante y Tampico pueden ser consideradas para la instalación de turbinas eólicas de uso residencial, por ejemplo, tipo Savonius, para la generación de energía eléctrica.

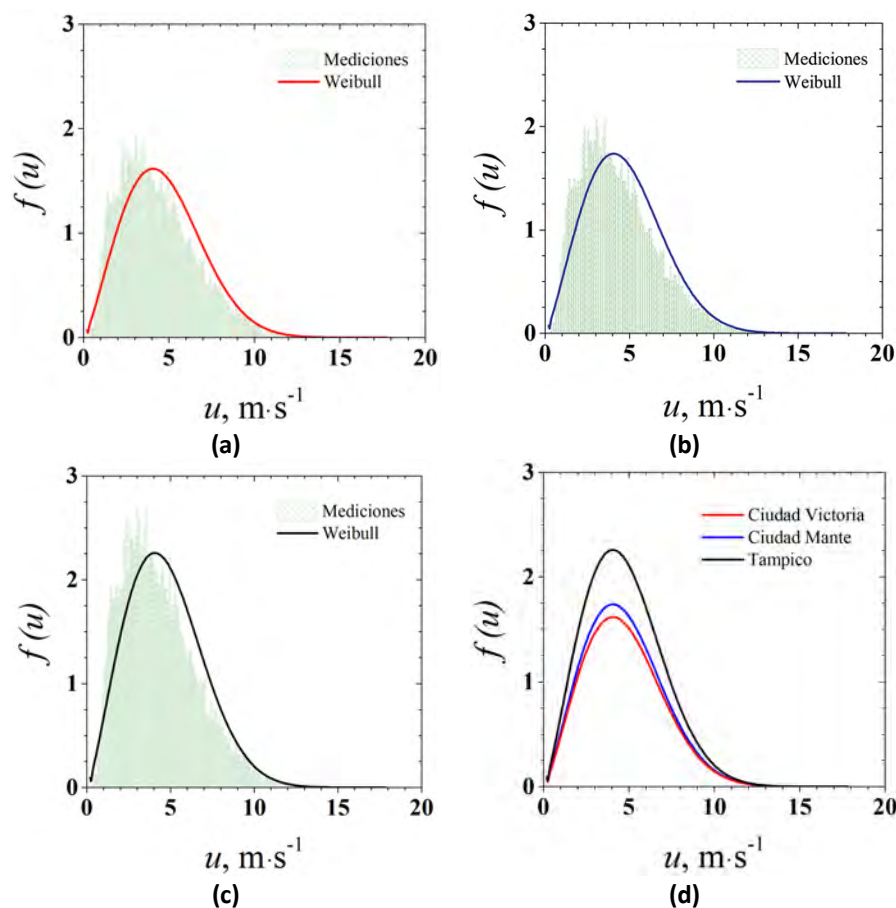


Figura 1. Datos de velocidad de viento: a) Cd. Victoria, b) Cd. Mante, c) Tampico, y d) Comparación en la distribución de Weibull

Conclusiones

Para determinar la viabilidad en el uso de aerogeneradores es necesario conocer el potencial eólico, en este sentido, la función de distribución de Weibull es una herramienta útil. Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que el uso de la función de distribución de Weibull representa adecuadamente el comportamiento estadístico de la velocidad del viento en la zona sur del estado de Tamaulipas. Esta representación probabilística es útil para evaluar el potencial eólico en regiones donde no existen mediciones directas y continuas del viento.

Estas condiciones sugieren que, si bien las velocidades registradas no alcanzan los valores óptimos para grandes aerogeneradores, sí podrían ser aprovechadas mediante turbinas de eje vertical tipo Savonius, que pueden operar eficientemente a bajas velocidades del viento y a alturas reducidas. Esto abre una vía factible para el aprovechamiento local de energía eólica en comunidades aisladas del sur de Tamaulipas que actualmente enfrentan condiciones de pobreza energética. En consecuencia, los datos presentados respaldan la viabilidad técnica del uso de microgeneración eólica con aerogeneradores tipo Savonius como estrategia complementaria para la electrificación de localidades alejadas en el sur de Tamaulipas, México, en línea con los objetivos de acceso universal a la energía establecidos en la Agenda 2030.

Bibliografía

- CETAM. (2021). *Programa de fomento y aprovechamiento sustentable de la energía para el estado de Tamaulipas*.
 CONAGUA. (2025). *Estaciones meteorológicas automáticas (EMAS)*. Recuperado el 16 de junio de 2025 de <https://surl.it/kemxxf>
 Dewan, A., Tomar, S. S., Bishnoi, A. K., & Singh, T. P. (2023). Computational fluid dynamics and turbulence modelling in various blades of Savonius turbines for wind and hydro energy: Progress and perspectives. *Ocean Engineering*, 283, 115168. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115168>

- Dorado, A. L. E., & Núñez, M. P. C. (2021). Características de la pobreza energética en México: un enfoque desagregado. *Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública*, 14(30), 77–116.
- Energy, G. (2024). *Tamaulipas proyecta 20 nuevos parques eólicos para 2030*. Recuperado el 6 de junio de 2025 de <https://surl.lu/tsyuwr>
- INEGI. (2020). *Información demográfica y social. Censo de población y vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Martheyn Lizarazo, G. A., & Rubio Ramírez, C. R. (2017). Diseño de un prototipo de turbina eólica clase híbrido para bajas corrientes de aire. *Revista Cubana de Ingeniería*, 8(1), 30–37. <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/61>
- ONU. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Recuperado en 2025 de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- ONU. (2023). *Informe de los objetivos de desarrollo sostenible. Edición especial*. Naciones Unidas. <https://bit.ly/3z69jsA>
- Santillán, O. S. (2021). *Análisis de la pobreza energética y su impacto en el desarrollo sustentable de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sarma, N. K., Biswas, A., & Misra, R. D. (2014). Experimental and computational evaluation of Savonius hydrokinetic turbine for low velocity condition with comparison to Savonius wind turbine at the same input power. *Energy Conversion and Management*, 83, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.070>
- SENER. (2017). *Porciento de cobertura nacional*. Secretaría de Energía.
- SENER. (2022). *Relación de localidades del componente de instalación en sistemas aislados*. Secretaría de Energía.
- Serban, A., Paraschiv, L. S., & Paraschiv, S. (2020). Assessment of wind energy potential based on Weibull and Rayleigh distribution models. *Energy Reports*, 6, 250–267. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.08.048>
- Yancachajlla Tito, U., & Vilca Huayta, O. A. (2022). Caracterización del viento con la función de Weibull para una zona altoandina, Laraqueri – Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24, 190–198.

Reducción de cromo hexavalente usando una película de Nanocelulosa de Candelilla-FeO₃ sobre un electrodo Au

Ana Beatriz Morales-Cepeda ^{1,*}, Claudia Esmeralda Ramos-Galván ², Elda Elizabeth Villalobos-Neri ¹, Daniela García-Castelán ²

¹ Centro de Investigación en Petroquímica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Altamira, México

² Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Madero

* Autor de correspondencia: ana.mc@cdmadero.tecnm.mx

Contaminación de agua, suelo y aire (Contaminación de agua)

Recibido: 30 de julio de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 29 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.565>

Resumen: Una película de nanocelulosa de candelilla con FeO₃ fue dopada sobre un electrodo de oro para reducir el cromo hexavalente a cromo (III). Esta reducción fue caracterizada mediante análisis de voltamperometría cíclica, observando el rendimiento electroquímico en la reducción del cromo hexavalente. También se caracterizó la película de nanocelulosa de candelilla con FeO₃ por medio del microscopio óptico, para observar las fibras de nanocelulosa y la distribución de las partículas de Fe en el material. Las películas mostraron en la superficie el Fe al aumentar la cantidad de este. La caracterización de voltamperometría cíclica demostró mayor actividad en la reducción del Cr VI a Cr III al aumentar la cantidad de FeO₃ en la película sobre el electrodo de oro.

Palabras clave: nanocelulosa de candelilla, reducción Cr VI, película, electrodo de Au

Reduction of hexavalent chromium using a Candelilla-FeO₃ nanocellulose film on an Au electrode

Abstract: A candelilla nanocellulose film with FeO₃ was deposited onto a gold electrode to reduce hexavalent chromium to chromium III. This reduction was characterized by cyclic voltammetry analysis, which observed the electrochemical performance during the reduction of Cr VI. The candelilla nanocellulose film with FeO₃ was also characterized using an optical microscope to observe the nanocellulose fibers and the distribution of Fe particles in the material. The films showed the presence of Fe on the surface by increasing its amount. Cyclic voltammetry characterization demonstrated increased activity in the reduction of Cr VI to Cr III as the amount of FeO₃ increased in the film on the gold working electrode.

Keywords: candelilla nanocellulose, Cr VI reduction, film, Au electrode

Introducción

La contaminación debido a metales pesados es uno de los grandes problemas que existen en áreas de industrialización intensiva a consecuencia de la descarga de agua residual contaminada con metales pesados que utilizan las industrias químicas como el cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y zinc, lo que implica un peligro para la salud de los seres vivos. El cromo hexavalente es utilizado en la industria de acabados metálicos, pigmentos y en la producción del acero inoxidable. Este cromo VI es dañino para la flora, fauna y el ser humano por ser altamente tóxico, ya que es de fácil absorción por las células del cuerpo; en cambio, el estado oxidado de Cr III es menos tóxico; la ventaja es que precipita con facilidad y no es tan fácilmente absorbido por las células.

Por otro lado, la nanocelulosa proviene de celulosa, polímero natural por excelencia, ya que es el más abundante en el planeta. La nanocelulosa se obtiene de métodos químicos, mecánicos o biológicos; se ha demostrado que tiene capacidad electroquímica para la retención de metales en su estructura.

La nanocelulosa obtenida de la candelilla ha sido estudiada por Pulido-Barragán *et al.* (2021), reportado su método de extracción. Gómez-Rojas *et al.* (2022) demostraron que la nanocelulosa con FeO₃ puede ser implementada en electrodos en la detección de Pb II o para oxidar iones de plomo en soluciones acuosas. En esta investigación se estudió el efecto de la nanocelulosa de candelilla/FeO₃ en la reducción de Cr III.

Materiales y Métodos

Obtención de la nanocelulosa con FeO_3

La nanocelulosa de la candelilla se obtuvo del procedimiento reportado por Pulido-Barragán *et al.* (2021). La nanocelulosa con FeO_3 se obtuvo con el procedimiento de Macclesh del Pino *et al.* (2020) y Gómez-Rojas *et al.* (2023). El proceso ocurre en un medio alcalino, utilizando para un gramo de celulosa de candelilla blanqueada, 16 mg de N-oxil-2,2,6,6-tetrametilpiperidina (TEMPO, Aldrich), 100 mg de NaBr (Aldrich) y 15 ml de NaOCl (Fermont) en 100 ml de agua destilada. En el caso de la nanocelulosa-Fe se necesita calcular el porcentaje de Fe requerido (Tabla 1). El TEMPO 0.01 mmol y NaBr 0.1 mmol se agregan a la celulosa de candelilla previamente disuelta en agua. Una vez disuelta la celulosa, se disolvió sulfato de hierro (Fermont) en agua, esta muestra se mantuvo en agitación constante hasta la disolución completa del TEMPO. Posteriormente se agregó NaClO, se monitorea el pH de la reacción ya que debe mantenerse en un intervalo de 10 – 11 con ayuda de NaOH 0.5 M (Fermont) a temperatura ambiente. La nanocelulosa con Fe obtenida se somete a lavados utilizando agua hasta obtener un pH neutro.

Tabla 1 Diseño de Experimentos para un gramo de celulosa de candelilla

Muestra		%Fe
Nanocelulosa	NC	0
Nanocelulosa con Fe al 3%	NC – Fe3	3
Nanocelulosa con Fe al 5%	NC – Fe5	5
Nanocelulosa con Fe al 7%	NC – Fe7	7

Elaboración de películas de nanocelulosa FeO_3 sobre el electrodo

Se vertieron 2 mililitros de una solución de NC- FeO_3 sobre un electrodo de Au de marca Methrom®, se secó a la temperatura de 30 °C por 4 días hasta la evaporación (Figura 1). Las películas de Nanocelulosa FeO_3 , en microscopio óptico, se realizaron vertiendo la solución de NC-FeO, con isopropanol se dejó secar a 30°C por 96 horas hasta evaporación.

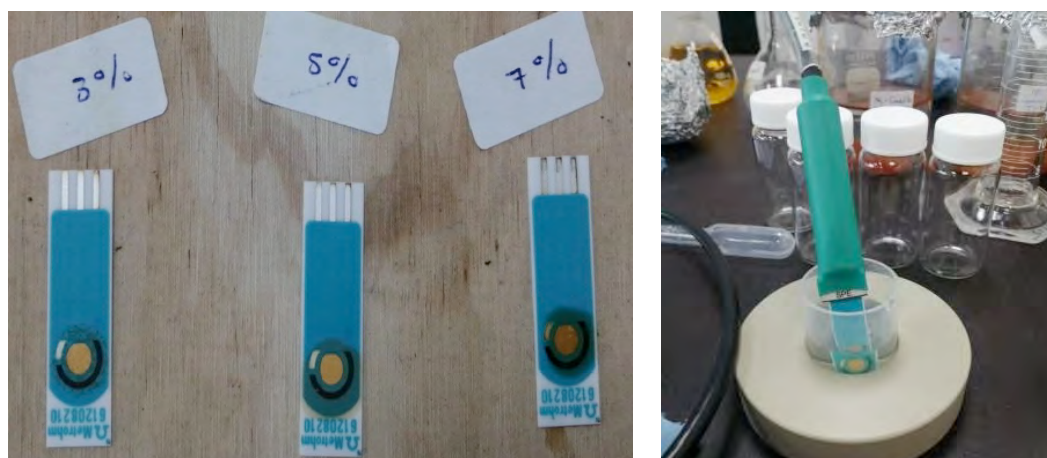


Figura 1. Electrodo de Au con NC-Fe%

Se utilizó un microscopio óptico ZEISS® Axio Lab. A1® (hecho en Alemania) utilizando una Cámara Motic® (hecho en Reino Unido), el software utilizado fue Motic®. Para el análisis de voltamperometría, se utilizó un potenciostato Metrohm® 910 PSTAT mini, con electrodos de Au.

Resultados y Discusión

La nanocelulosa con FeO_x obtuvo diferentes coloraciones desde un color anaranjado cercano a la tonalidad rojiza conforme la concentración de hierro fue aumentando (Figura 2).

Microscopio óptico. En la Figura 3, se observan las nanopartículas de hierro en el microscopio con luz polarizada en tonos verdes y azules, además de ciertos colores como el naranja o el dorado que representan la nanocelulosa. Al aumentar la concentración de hierro, aumenta; se observan de color azul verdoso correspondientes al Fe dispersados conforme se obtenga mayor cantidad de Fe en la superficie.



Figura 2. Soluciones de NC con 3%, 5% y 7% de Fe de izquierda a derecha

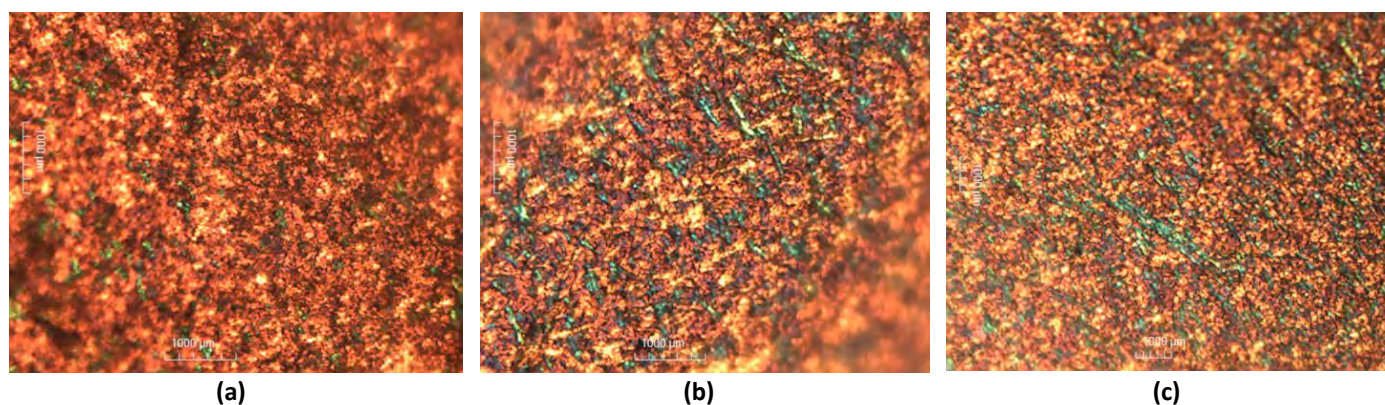


Figura 3. Imágenes del microscopio óptico con luz polarizada de las películas NC-Fe con a) 3% Fe, b) 5% Fe y c) 7% Fe

Detección electroquímica de Cr VI mediante un electrodo de Au dopado con NC – Fe

Para el análisis con electrodos de oro se trabajó con un electrodo de oro dopado con NC-Fe%. La respuesta voltamperimétrica del cromo hexavalente a varias velocidades de barrido se examinó mediante voltametría de barrido lineal en un electrodo de oro ($A = 0.07 \text{ cm}^2$).

Los voltamperogramas registrados a diferentes velocidades de exploración ($10\text{--}400 \text{ mV s}^{-1}$) en una solución de HCl 0.1 M que contiene 50 M de Cr VI se muestran en la figura 4. Estos revelan un proceso con un potencial máximo de $+0.27 \text{ V}$ (10 mV s^{-1}), que se encontró que cambiaba hasta $+0.25 \text{ V}$ (400 mV s^{-1}) con un aumento de la velocidad de exploración. El potencial máximo no depende significativamente de la velocidad de barrido, lo que sugiere que la reacción es electroquímicamente reversible en el electrodo de Au.

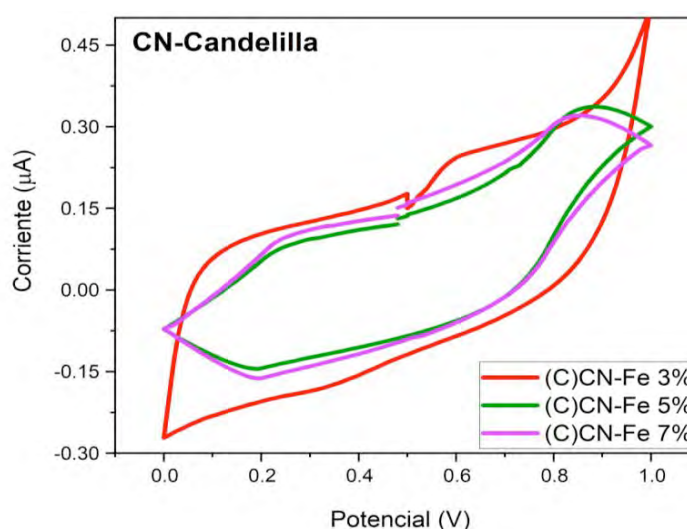


Figura 4. Voltamperograma cíclico ampliado

Después de los voltamperogramas que se tienen como referencia se procedió a realizar dos análisis electroquímicos, uno de ellos con una concentración de 5 mg/L de Cr VI y otro con una concentración de 0.05 mg/L de Cr VI, de igual forma con una variación en la velocidad de barrido tomando el siguiente rango 0.1-1 V/s, por lo que se obtuvieron los siguientes voltamperogramas cíclicos mostrados en las figuras 5a, 5b, 5c y 5d.

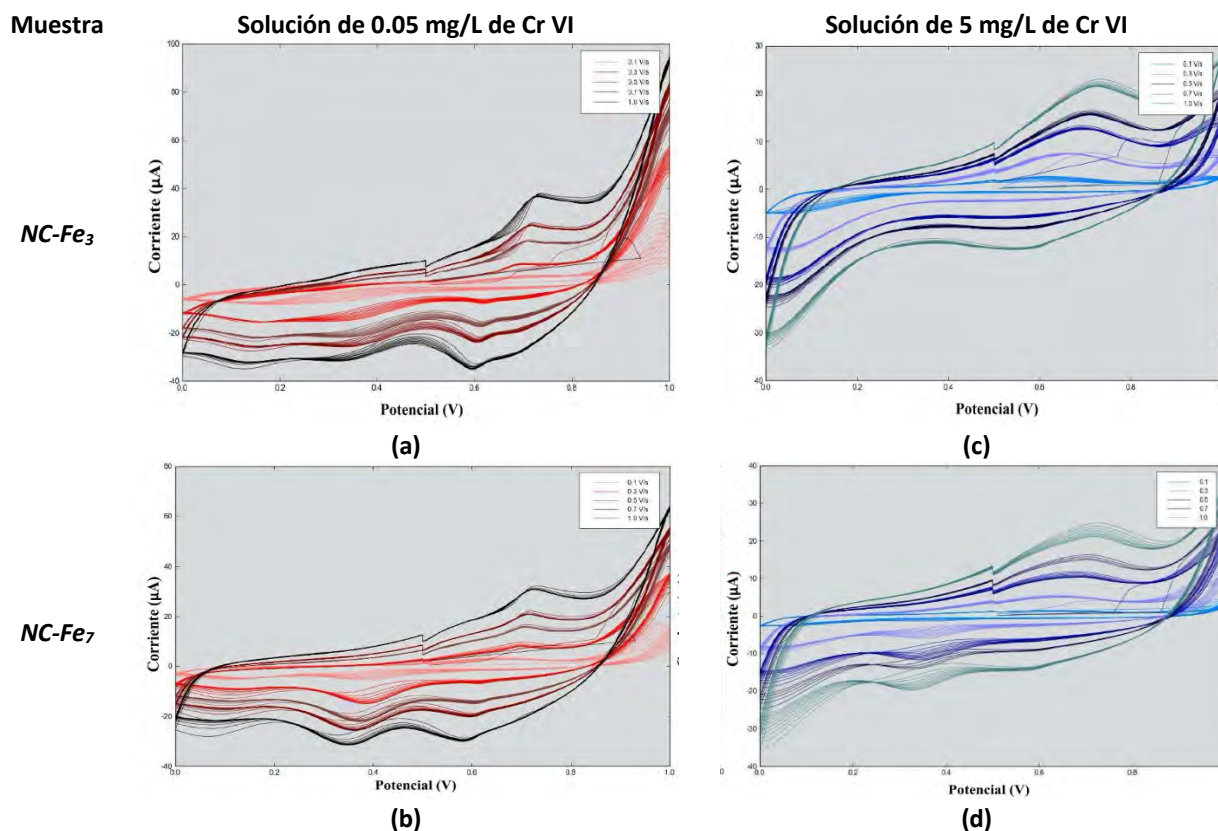


Figura 5. Voltamperograma cíclico con electrodo de Au dopado

Conclusiones

El electrodo de oro dopado con la película de nanocelulosa de candelilla con Fe fue capaz de reducir el cromo VI a cromo III. Este resultado nos propone una oportunidad para la reducción del cromo, que es un contaminante en la industria textilera, de acero, etc. Esta película ha sido capaz de oxidar plomo y reducir cromo en diferentes electrodos, lo que abre una ventana a nuevas investigaciones, como seguir estudiando su carácter óxido-reductor en el tratamiento de aguas residuales de la industria de textilera, de acero, etc.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de Ciudad Madero por el apoyo económico recibido, así como por el uso de las instalaciones del Centro de Investigación en Petroquímica.

Bibliografía

- Pulido-Barragán, E. U., Morales-Cepeda, A. B., Castro-Guerrero, C. F., Koschella, A., & Heinze, T. (2021). Upgrading *Euphorbia antisiphilitica* fiber compost: A waste material turned into nanocrystalline cellulose. *Industrial Crops and Products*, 160, 113111. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113111>
- Macclesh del Pino Pérez, L. A., Morales-Cepeda, A. B., & Castro-Guerrero, C. F. (2021). One-step *in situ* synthesis of Ag/AgCl nanoparticles in a cellulose nanofiber matrix for the development of energy storage paper. *Cellulose*, 28, 6339–6351. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03922-7>
- Gómez-Rojas, A. G., Macclesh del Pino Pérez, L. A., Castro-Guerrero, C. F., Ramos-Galván, C. E., & Morales-Cepeda, A. B. (2023). Electrochemical oxidation of Pb(II) using carbon electrodes doped with nanocellulose-FeOx. *Fibers*, 11(1), 8. <https://doi.org/10.3390/fib11010008>

Efecto de fitohormonas en la producción de biomasa, pigmentos, y proteínas por *Scenedesmus obliquus* cultivada en medio Bold Basal Modificado (BBM)

Brenda Yanin Azcárraga-Salinas ^{1,*}, María Myrna Solís-Oba ¹, Luis Carlos Fernández-Linares ², José Agustín Pacheco-Ortiz ¹, Annette Arisbeth Jiménez-Córdoba ¹, Andres Castro-Sierra ¹ y Javier Ruiz-Romero ¹

¹ Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA), Instituto Politécnico Nacional, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México

² Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI), Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

* Autor de correspondencia: bazcarragas1900@alumno.ipn.mx

Energías Renovables (Biomasa)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 30 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.528>

Resumen: En la actualidad la obtención de compuestos de valor agregado de una forma más sustentable es de suma importancia. Una alternativa es el cultivo de microalgas en medios de cultivo orgánicos a base de residuos. Estos contienen macro y micronutrientes útiles para las microalgas, además de fitohormonas. Las fitohormonas tienen efecto positivo en plantas y, en las microalgas, al tener un metabolismo similar, pueden resultar benéficas. En este sentido, conocer qué fitohormonas impactan en el crecimiento y producción de compuestos de interés es necesario. En este trabajo se evaluó el efecto de la adición exógena de 5 mg/L de 5 fitohormonas: ácido indol acético (IAA), ácido giberélico (GA), ácido abscísico (ABA), ácido salicílico (AAS) y kinetina (KN) en medio bold basal modificado (BBM), comparando su efecto individual con el medio BBM sin adición de fitohormonas. La adición de ABA y KN tuvieron efecto significativo (Fisher LSD, $p < 0.05$) $n=2$. Se incrementó la producción de biomasa, clorofila a, b, pigmentos totales y proteínas, alrededor del 34% la producción de pigmentos totales y del 16.22% la producción de proteínas.

Palabras clave: biomasa, proteínas, fitohormonas, *Scenedesmus obliquus*

Effect of plant phytohormones on biomass, pigments, and protein production by *Scenedesmus obliquus* grown in Modified Bold Basal (BBM) medium

Abstract: Nowadays, obtaining value-added compounds in a more sustainable way is of utmost importance. An alternative is the cultivation of microalgae in organic waste-based culture media. These contain macro and micronutrients useful for microalgae, as well as phytohormones. Phytohormones have a positive effect on plants and, in microalgae, having a similar metabolism, they can be beneficial. In this sense, knowing which phytohormones impact the growth and production of compounds of interest is necessary. In this study, the effect of the exogenous addition of 5 mg/L of 5 phytohormones was evaluated: indole acetic acid (IAA), gibberellic acid (GA), abscisic acid (ABA), Salicylic acid (AAS) and kinetin (KN) in modified basal bold medium (BBM), comparing their individual effect with BBM medium without addition of phytohormones. The addition of ABA and KN had a significant effect (Fisher LSD, $p < 0.05$) $n=2$. The production of biomass, chlorophyll a, b, total pigments, and proteins increased, the production of total pigments by about 34% and the production of proteins by 16.22%.

Keywords: biomass, proteins, phytohormones, *Scenedesmus obliquus*

Introducción

En la actualidad, un desafío importante es el desarrollo de procesos más sustentables para la obtención de productos de valor agregado, como son los pigmentos y las proteínas. Donde se busca la disminución de la dependencia de fuentes convencionales que conlleven un alto impacto ambiental y costo en los ecosistemas. En este contexto, las microalgas son una fuente alternativa y renovable de compuestos de alto valor aplicables en diversas industrias como la alimentaria, cosmética o de biocombustibles (Balasubramaniam *et al.*, 2021), ejemplo de estos compuestos son los pigmentos y las proteínas.

Entre los pigmentos más utilizados está la clorofila, la cual tiene usos diversos, puede utilizarse como colorante natural y en la producción de cosméticos para el cuidado de la piel, además de que tiene beneficios a la salud como antiinflamatorio y agente antitumoral (Subramoniam *et al.*, 2012).

Las proteínas son un componente imprescindible en la dieta humana y animal. A pesar de los beneficios que las microalgas pueden ofrecer, su aprovechamiento a escala industrial aún presenta varios desafíos, como la optimización

de las condiciones y medios de cultivo para maximizar su crecimiento y con ello la producción de biomasa y compuestos de valor agregado (Mohamadnia *et al.*, 2021; Morowvat & Ghasemi, 2016; Verma *et al.*, 2020).

Respecto a la optimización de medios de cultivo para microalgas, hay reportes indicando el uso de medios de cultivo orgánicos no convencionales como el digestato o el té de vermicomposta, ya que estos contienen fitohormonas como el ácido indol acético (AIA), ácido giberélico (AG) o kinetina (KN) (Castro-Sierra *et al.*, 2024).

El uso de fitohormonas representa una valiosa herramienta, ya que su uso permite la inducción de respuestas metabólicas que permitan incrementar el contenido proteico y la biomasa, lo cual representa una alternativa para el uso eficiente de recursos y la valorización de la biomasa microalgal (Romanenko *et al.*, 2016).

El IAA estimula la división celular en microalgas, lo cual podría incrementar la producción de biomasa y clorofila cuando es aplicado en concentraciones adecuadas (Dao *et al.*, 2018). El AG y KN son citoquininas que favorece la división celular y el metabolismo fotosintético, lo cual se ha reportado que incrementa la producción de biomasa y pigmentos en microalgas como *Chlorella vulgaris* (Piotrowska & Czerpak, 2009) y *Dunaliella salina* (Mousavi *et al.*, 2016). El ABA es conocido por su rol en el estrés abiótico, porque induce la acumulación de lípidos en microalgas y el ácido salicílico a bajas concentraciones puede actuar como promotor de crecimiento, mientras que a concentraciones elevadas puede inducir estrés oxidativo y limitar el rendimiento metabólico (Wu *et al.*, 2018).

En este estudio se evaluó el efecto de cinco fitohormonas (ácido indol acético, ácido giberélico, ácido abscísico, ácido salicílico y kinetina) sobre el crecimiento, la producción de biomasa, pigmentos y proteínas de *Scenedesmus obliquus* crecida en BBM, con el objetivo de una posible aplicación biotecnológica sostenible a mayor escala con el uso de medios enriquecidos.

Materiales y Métodos

Materiales y reactivos

La microalga *Scenedesmus obliquus* fue donada del Laboratorio de Bioprocesos de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI) del Instituto Politécnico Nacional.

Las fitohormonas utilizadas fueron ácido indol acético (IAA) con 98% de pureza, marca Sigma-Aldrich, ácido abscísico (ABA), 98% de pureza, marca Sigma-Aldrich, ácido giberélico (GA), 90% de pureza, marca Caisson, Kinetina (KN), 99% de pureza, marca Caisson y ácido salicílico (AAS), pureza 99%, marca Sigma-Aldrich. El medio de cultivo bold basal modificado fue preparado y ajustado al pH de acuerdo con metodologías características (Bedane & Asfaw, 2023).

Cultivo

El cultivo de la microalga *Scenedesmus obliquus* se llevó a cabo con fotoperiodo luz: oscuridad (14:10), temperatura (25°C), intensidad luminosa (3000 luxes) durante 12 días. El preinóculo fue del 10% del volumen total del medio de cultivo ajustado a una densidad óptica de 0.8. Las fitohormonas evaluadas se adicionaron a cada tratamiento a una concentración de 5 mg/L. A los 6 días se analizó la biomasa en densidad óptica (600 nm), posteriormente a los 12 días de cultivo se analizó la producción de biomasa en peso seco y densidad óptica, el contenido de clorofila a, b, carotenoides, pigmentos totales y proteínas.

Cuantificación de pigmentos

Se centrifugó 1 mL de cultivo de microalgas a 13,000 rpm durante 5 minutos y se resuspende la pastilla celular con 1 mL de metanol, se coloca en baño maría a 60°C durante 10 minutos y se almacena por 24 h a 4°C en oscuridad, se centrifuga a 13,000 rpm durante 5 minutos y se lee la absorbancia del extracto en un espectrofotómetro uv-vis marca Thermo scientific® modelo Multiskan GO del extracto a 3 longitudes de onda: 470, 653 y 666 nm utilizando metanol como blanco (Wellburn, 1994).

Determinación de proteínas

Se centrifuga 1 mL de cultivo celular a 13,000 rpm por 5 minutos, se hidroliza la biomasa obtenida con 1 mL de NaOH 1 N o en baño maría en ebullición durante 2 horas, posteriormente se colocan 100 μ L del hidrolizado en celdas de plástico con 1 mL del reactivo de Bradford. Se mantiene la mezcla en reposo durante 10 minutos y se lee la absorbancia a 595 nm. Se calcula la concentración con una curva estándar de albúmina (0 a 300 mg/L, r^2 0.99) (Bradford, 1976).

Análisis estadístico

Se realizó un diseño completamente al azar y los resultados fueron evaluados mediante una prueba de Fisher LSD ($p < 0.05$) en el programa OriginLab. Todas las muestras fueron evaluadas por duplicado.

Resultados y Discusión

La producción de biomasa se vio influenciada por la adición de algunas fitohormonas. La cuantificación por densidad óptica refleja que a la mitad del cultivo (6 días) solo la adición de IAA mostró diferencias estadísticamente significativas respecto al cultivo en el control, medio bold basal modificado (BBM); sin embargo, posteriormente, al final del cultivo (12 días), la adición de las fitohormonas AIA, ABA y KN mostraron diferencias estadísticas respecto al control (Figura 1 a). Por otro lado, la producción de biomasa en peso seco no mostró diferencias estadísticamente significativas sino numéricas entre los tratamientos, siendo KN y ABA los tratamientos semejantes a BBM (Figura 1 b). En ambos casos, a los 12 días de cultivo, las fitohormonas ABA y KN tuvieron el mayor efecto en la producción de biomasa.

Reportes indican que 2 μ m de ABA incrementan hasta 2.1 veces la producción de biomasa por *Scenedesmus quadricauda* posterior a 48 horas de cultivo (Hirose et al., 2008). Así también se reportó un incremento en la densidad celular de la microalga *Tetraselmis suecica* en medio de cultivo suplementado con 15 mg/L de kinetina (Asghari et al., 2023).

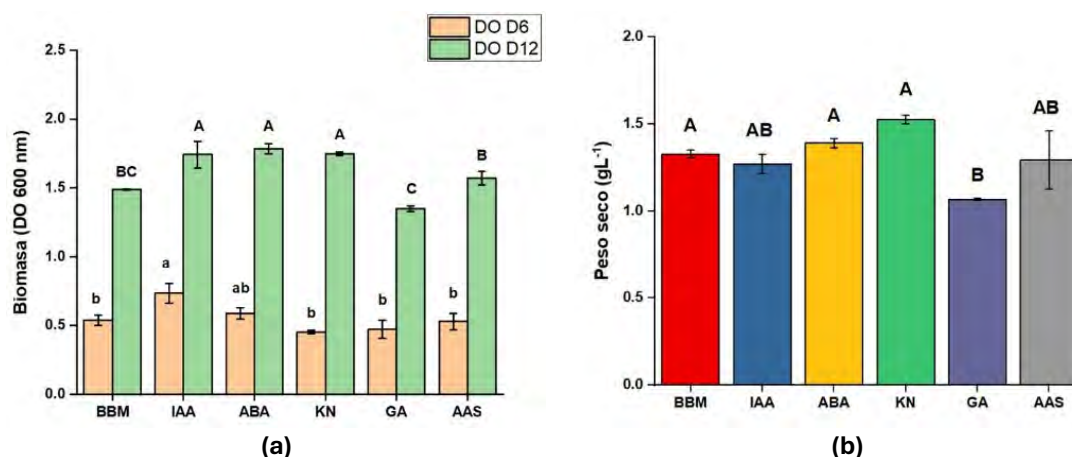


Figura 1. Producción de biomasa de *Scenedesmus obliquus* crecida en medio bold basal modificado (BBM) adicionado con diferentes fitohormonas ácido indol acético (AIA), ácido abscísico (ABA), kinetina (KN), ácido giberélico (GA) y ácido acetil salicílico (AAS): (a) cuantificación de biomasa al día 6 y 12 de cultivo por densidad óptica (600 nm) y (b) cuantificación de biomasa en peso seco al día 12 de cultivo. Las medias con literales iguales en las barras no presentan diferencias estadísticamente significativas (Fisher LSD, $p < 0.05$) $n=2$, se muestran las barras de error (SE)

La producción de pigmentos se vio influenciada por la adición de fitohormonas en el medio de cultivo, siendo ABA, KN y GA las fitohormonas que tuvieron mayor efecto en la producción de clorofila a, respecto a BBM, lo cual representó aproximadamente un 44% mayor producción de clorofila a en ABA, comparado con BBM. De forma similar, la producción de clorofila b fue favorecida por ABA, la cual tuvo valores estadísticamente significativos respecto a BBM, mientras que los tratamientos KN y GA no mostraron diferencias estadísticas, pero sí numéricas en la producción de este pigmento. La producción de carotenoides no tuvo diferencias estadísticas en los tratamientos, siendo el pigmento de menor producción (Figura 2 a). La producción de pigmentos totales fue más favorable para los tratamientos adicionados con ABA y KN, siendo de alrededor de un 34% mayor respecto a BBM (Figura 2 b).

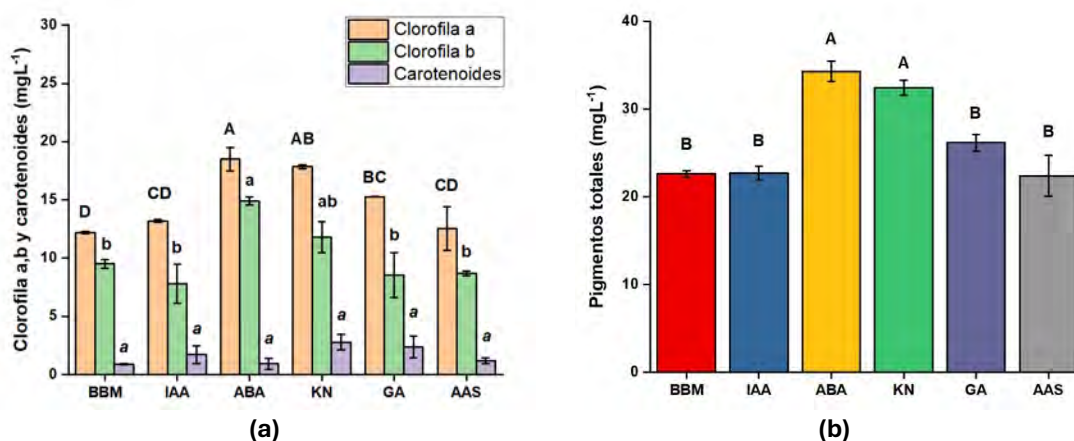


Figura 2. Producción de pigmentos de *Scenedesmus obliquus*: (a) producción de clorofila a, b y carotenoides y (b) producción de pigmentos totales. Las medias con literales iguales en las barras verticales no presentan diferencias estadísticamente significativas (Fisher LSD, $P < 0,05$). Barras de error (SE)

Estos resultados concuerdan con lo encontrado en el trabajo de Asghari *et al.*, (2023), donde el contenido de pigmentos y la actividad de enzimas como catalasa y super óxido dismutasa medidos después de 10 días, incrementaron significativamente en presencia de kinetina ($p < 0.05$) para el crecimiento de la microalga *Tetraselmis suecica*. Así también, ABA exógeno estimuló la división celular en la producción de biomasa, biosíntesis de clorofila, carotenoides y lípidos de la microalga *C. zofingiensis* en un experimento por lotes no aséptico (Kozlova *et al.*, 2023).

La producción de proteínas de igual forma se vio favorecida por las fitohormonas ABA y Kinetina, siendo su producción total de cerca de 100 mg/L, lo cual fue estadísticamente mayor ($p < 0.05$) que solo el medio BBM y la adición de las demás fitohormonas. Los tratamientos ABA y KN tuvieron una producción de aproximadamente 16.22% más de proteínas que el medio sin fitohormonas BBM. Trabajos reportan el efecto de distintas fitohormonas, entre ellas ABA a distintas concentraciones (0, 0.1, 0.5, 1, 10, 20 y 50 mg/L), en donde la concentración más alta de 50 mg/L de la adición de esta fitohormona tuvo un efecto estadísticamente significativo en la producción de proteínas, alcanzando producción de aproximadamente 25 mg/g de este compuesto (Du *et al.*, 2020).

El mecanismo de señalización de ABA está bien documentado en plantas, comienza cuando ABA se une a los receptores PYL, inhibe a PP2C y libera SnRK2, que fosforila TFs tipo AREB/bZIP, que fosforila genes de estrés, ROS y transcripción (Umezawa *et al.*, 2010). En microalgas se han reportado genes homólogos en *Chlamydomonas reinhardtii* y la producción de proteínas de defensa (Colina *et al.*, 2019). Por otro lado, KN es una citoquinina sintética. Las citoquininas tienen efecto en el incremento del número de células y la acumulación endógena de proteínas, clorofilas y monosacáridos en *Chlorella vulgaris*, ya que pueden estimular la transcripción de ARNr/ARNt y maquinaria ribosomal (Bajguz & Piotrowska-Niczyporuk, 2014).

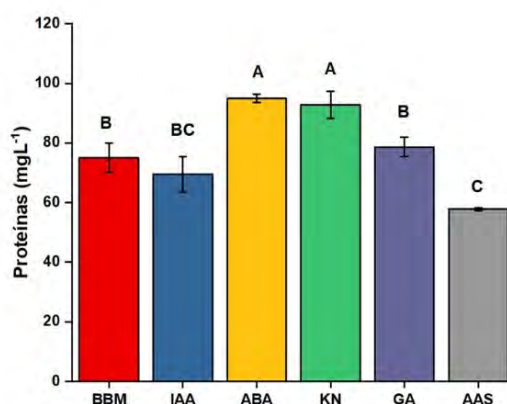


Figura 3. Efecto de la adición de fitohormonas en la producción de proteínas por *Scenedesmus obliquus*. Las medias con literales iguales en las barras no presentan diferencias estadísticamente significativas (Fisher LSD, $P < 0,05$), se muestran las barras de error (SE)

Conclusiones

Los tratamientos adicionados con 5 mg/L de las fitohormonas ABA y KN presentaron la mayor producción de biomasa en peso seco, producción de clorofila a, b y pigmentos totales. Esta información es importante ya que en medios de cultivo orgánicos contienen fitohormonas que pueden ser utilizados para el crecimiento de microalgas y a su vez la producción de compuestos de valor agregado de una forma más sustentable y con menor impacto ambiental. El estudio realizado solo fue evaluado en una única concentración de estas fitohormonas (5 mg/L). Como perspectiva se pretende evaluar otras concentraciones, ya que los posibles efectos pueden ser dosis-respuesta. Otra perspectiva es la evaluación en digestato y escalamiento en fotobiorreactor.

Agradecimientos y financiamiento: a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada 1003544. A la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional y a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECTEI) por el financiamiento para el desarrollo del presente proyecto.

Bibliografía

- Bajguz, A., & Piotrowska-Niczyporuk, A. (2014). Efecto interactivo de los brasinoesteroides y citoquininas sobre el crecimiento, la clorofila, el monosacárido y el contenido de proteínas en el alga verde *Chlorella vulgaris* (Trebouxioophyceae). *Plant Physiology and Biochemistry*, 80, 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.04.009>
- Balasubramaniam, V., Gunasegavan, R. D.-N., Mustar, S., Lee, J. C., & Mohd Noh, M. F. (2021). Isolation of industrial important bioactive compounds from microalgae. *Molecules*, 26(4), Article 4, <https://doi.org/10.3390/molecules26040943>
- Bedane, D. T., & Asfaw, S. L. (2023). Microalgae and co-culture for polishing pollutants of anaerobically treated agro-processing industry wastewater: the case of slaughterhouse. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), 81, <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00699-4>
- Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248-254, [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Castro-Sierra, A., Espinosa-Solares, T., Houbron, E., Castro-Rivera, R., Azcárraga-Salinas, B. Y., & Solís-Oba, M. M. (2024). Production of phytoestrogens during anaerobic digestion of bovine and swine manures. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 23(3), <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio24289>
- Colina, F., Amaral, J., Carbó, M., Pinto, G., Soares, A., Cañal, M. J., & Villedor, L. (2019). Genome-wide identification and characterization of CKIN/SnRK gene family in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Scientific Reports*, 9(1), 350. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35625-8>
- Dao, G.-H., Wu, G.-X., Wang, X.-X., Zhuang, L.-L., Zhang, T.-Y., & Hu, H.-Y. (2018). Enhanced growth and fatty acid accumulation of microalgae *Scenedesmus* sp. LX1 by two types of auxin. *Bioresource Technology*, 247, 561-567, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.079>
- Du, H., Ren, J., Li, Z., Zhang, H., Wang, K., Lin, B., Zheng, S., Zhao, C., Meng, C., & Gao, Z. (2020). Plant growth regulators affect biomass, protein, carotenoid, and lipid production in *Botryococcus braunii*. *Aquaculture International*, 28(3), 1319-1340, <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00528-x>
- Hirose, N., Takei, K., Kuroha, T., Kamada-Nobusada, T., Hayashi, H., & Sakakibara, H. (2008). Regulation of cytokinin biosynthesis, compartmentalization and translocation. *Journal of Experimental Botany*, 59(1), 75-83, <https://doi.org/10.1093/jxb/erm157>
- Kozlova, T. A., Kartashov, A. V., Zadneprovskaya, E., Krapivina, A., Zaytsev, P., Chivkunova, O. B., & Solovchenko, A. E. (2023). Effect of abscisic acid on growth, fatty acid profile, and pigment composition of the Chlorophyte *Chlorella* (*Chromochloris*) *zofingiensis* and its co-culture microbiome. *Life*, 13(2), Article 2, <https://doi.org/10.3390/life13020452>
- Mohamadnia, S., Tavakoli, O., & Faramarzi, M. A. (2021). Enhancing production of fucoxanthin by the optimization of culture media of the microalga *Tisochrysis lutea*. *Aquaculture*, 533, 736074, <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736074>
- Morowvat, M. H., & Ghasemi, Y. (2016). Optimización del medio de cultivo para mejorar la producción de β -caroteno y biomasa por *Dunaliella salina* en cultivo mixotrófico. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 7, 217-223, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.06.008>
- Mousavi, P., Morowvat, M., Montazeri-Najafabady, N., Abolhassanzadeh, Z., Mohagheghzadeh, A., Hamidi, M., Niazi, A., & Ghasemi, Y. (2016). Investigating the effects of phytohormones on growth and beta-carotene production in a naturally isolates stain of *Dunaliella salina*. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 164-171, <https://doi.org/10.7324/JAPS.2016.60826>
- Piotrowska, A., & Czerpak, R. (2009). Cellular response of light/dark-grown green alga *Chlorella vulgaris* Beijerinck (Chlorophyceae) to exogenous adenine- and phenylurea-type cytokinins. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31(3), 573-585, <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0267-y>
- Romanenko, K. O., Kosakovskaya, I. V., & Romanenko, P. O. (2016). Phytohormones of Microalgae: Biological Role and Involvement in the Regulation of Physiological Processes. *International Journal on Algae*, 18(2), <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v18.i2.70>
- Subramoniam A, Asha VV, Nair SA, Sasidharan SP, Sureshkumar PK, Rajendran KN, Karunakaran D, Ramalingam K (2012) Chlorophyll revisited: anti-inflammatory activities of chlorophyll a and inhibition of expression of TNF a gene by the same. *Inflammation* 35:959–966, <https://doi.org/10.1007/s10753-011-9399-0>
- Umezawa, T., Nakashima, K., Miyakawa, T., Kuromori, T., Tanokura, M., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2010). Molecular Basis of the Core Regulatory Network in ABA Responses: Sensing, Signaling and Transport. *Plant and Cell Physiology*, 51(11), 1821-1839. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcq156>
- Verma, R., Kumari, K. V. L. K., Srivastava, A., & Kumar, A. (2020). Photoautotrophic, mixotrophic, and heterotrophic culture media optimization for enhanced microalgae production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104149, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104149>
- Wellburn, A. R. (1994). Determinación espectral de clorofilas a y b, así como carotenoides totales, usando varios disolventes con espectrofotómetros de diferente. *Journal of Plant Physiology*, 144(3), 307-313, [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
- Wu, G., Gao, Z., Du, H., Lin, B., Yan, Y., Li, G., Guo, Y., Fu, S., Wei, G., Wang, M., Cui, M., & Meng, C. (2018). The effects of abscisic acid, salicylic acid and jasmonic acid on lipid accumulation in two freshwater *Chlorella* strains. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 64(1), 42-49, <https://doi.org/10.2323/jgam.2017.06.001>

Análisis Electro–Térmico de Paneles Fotovoltaicos Utilizando Python

Irvin D. Velasquez-Mora, Rodolfo A. Vargas-Méndez *, Gloria L. Osorio-Gordillo, Carlos M. Astorga-Zaragoza y Juan Reyes-Reyes

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Int. Internado Palmira S/N, C.P. 62490, Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos, México

* Autor de correspondencia: rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx; Tel.: (777 264 7126)

Energías Renovables (Modelado y simulación computacional)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 7 de octubre de 2025

Publicado: 30 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.617>

Resumen: La tecnología fotovoltaica representa un pilar esencial en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles; sin embargo, su eficiencia se ve afectada por elevadas temperaturas de operación, el sombreado parcial y la formación de puntos calientes. En este trabajo se plantea como objetivo desarrollar e implementar un programa electrotérmico implementado en Python para analizar el comportamiento de módulos fotovoltaicos tanto a nivel de celda como de panel. La metodología integra modelos eléctricos, térmicos y de sombreado, lo que permite cuantificar pérdidas de eficiencia, generar curvas $I-V$ y $P-V$, así como detectar la formación de hotspots mediante mapeo térmico. Los resultados muestran que, bajo condiciones de irradiancia uniforme, la temperatura es el principal factor que reduce la eficiencia, mientras que el sombreado parcial —especialmente en patrones aleatorios y agrupados— provoca severas disminuciones de potencia y eleva de forma significativa la temperatura en las celdas afectadas. Estos hallazgos confirman la relevancia de un análisis conjunto eléctrico y térmico para caracterizar de manera precisa el desempeño de los sistemas fotovoltaicos. En conclusión, el programa desarrollado constituye una herramienta útil para evaluar escenarios reales de operación, optimizar la eficiencia y contribuir a la prolongación de la vida útil de los módulos.

Palabras clave: sistemas fotovoltaicos, Python, disipación térmica, sombreado parcial, eficiencia

Electro–Thermal Analysis of Photovoltaic Panels Using Python

Abstract: Photovoltaic technology represents a key pillar in the transition toward sustainable energy systems; however, its efficiency is affected by high operating temperatures, partial shading, and the formation of hot spots. This study aims to develop and implement an electrothermal program in Python to analyze the behavior of photovoltaic modules at both the cell and panel levels. The methodology integrates electrical, thermal, and shading models, enabling the quantification of efficiency losses, the generation of $I-V$ and $P-V$ curves, and the detection of hot spots through thermal mapping. The results show that, under uniform irradiance conditions, temperature is the main factor that reduces efficiency, while partial shading—especially in random and clustered patterns—causes severe power losses and significantly increases the temperature of affected cells. These findings confirm the relevance of combined electrical and thermal analysis for accurately characterizing the performance of photovoltaic systems. In conclusion, the developed program constitutes a useful tool for evaluating real operating scenarios, optimizing efficiency, and contributing to the extension of module lifetime.

Keywords: photovoltaic systems, Python, thermal dissipation, partial shading, efficiency

Introducción

Actualmente, las energías renovables son fundamentales para avanzar hacia un sistema energético global sostenible y garantizar la seguridad energética a largo plazo (Gayen *et al.*, 2024). Estas fuentes de energía renovable como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y biomasa aprovechan recursos naturales renovables para generar electricidad y calor, reduciendo significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles y contaminantes (Sebestyén, 2021).

Las investigaciones recientes sobre la transición energética resaltan que, además del despliegue inicial de capacidad fotovoltaica hacia 2050, será fundamental garantizar la renovación de los sistemas a largo plazo. En este sentido, la industria fotovoltaica enfrenta un desafío crítico, ya que la producción de paneles solares puede presentar oscilaciones significativas de hasta un 60%, dependiendo de la velocidad de instalación y de la vida útil de los equipos (Sepúlveda-Oviedo, 2025).

Las dinámicas industriales y económicas podrían afectar la estabilidad del sector, lo que subraya la necesidad de planificar no solo la expansión sino también el mantenimiento y la sostenibilidad futura de la energía solar como eje

central de la electricidad global en las próximas décadas (Herrmann *et al.*, 2014; Le Bihan *et al.*, 2025). Los sistemas fotovoltaicos en climas cálidos presentan desventajas críticas debido a que las altas temperaturas de operación disminuyen la eficiencia y aceleran la degradación de los materiales del módulo.

El rendimiento de los sistemas fotovoltaicos ha mostrado una disminución aproximada de -0.50% por cada 1°C adicional de temperatura, lo cual representa un desafío urgente para asegurar la fiabilidad y durabilidad en sistemas fotovoltaicos (Hudișteanu *et al.*, 2024). Además, el comportamiento eléctrico y térmico de los paneles puede verse afectado por factores ambientales adicionales como el polvo, la humedad, la lluvia y el sombreado parcial, que interfieren con la disipación térmica y pérdidas de potencia (Shaik *et al.*, 2023). Diversos estudios señalan que el análisis de estos fenómenos requiere el uso de técnicas de optimización y modelado integrado en sistemas renovables complejos (Bamisile *et al.*, 2025).

Python es un lenguaje abierto, gratuito y con una amplia comunidad científica que respalda su uso. Además, cuenta con librerías especializadas que facilitan diversos análisis, visualización, gestión de grandes volúmenes de datos y aspectos fundamentales en la investigación científica. La estructura modular de Python permite mejorar procesos de trabajo más claros y consistentes. El framework desarrollado en Python para el procesamiento y empaquetado de conjuntos masivos de imágenes científicas confirma su eficiencia, escalabilidad y versatilidad en distintos contextos de investigación (Jackett *et al.*, 2025).

Las herramientas de simulación eléctrico-térmicas integradas resultan indispensables para analizar en detalle la temperatura y las condiciones reales de irradiancia y sombreado parcial, factores que pueden disminuir la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es desarrollar e implementar un programa electrotérmico basado en Python para analizar el desempeño de módulos fotovoltaicos tanto a nivel de celda como de panel. El programa integra modelos eléctricos, térmicos y de sombreado para cuantificar las pérdidas de eficiencia, evaluar el impacto del sombreado parcial y detectar la formación de puntos calientes mediante mapeo térmico.

Materiales y Métodos

Módulo fotovoltaico

El panel fotovoltaico utilizado como base, corresponde a un módulo de 40 celdas dispuestas en una matriz de 4×10 , conformado por 4 strings en paralelo, cada uno integrado por 10 celdas en serie como se muestra en la Figura 1. La temperatura de referencia es de 25°C , el módulo presenta una corriente de cortocircuito por string de 2.2 A , lo que resulta en una corriente total aproximada de 8.8 A , y un voltaje de circuito abierto de 37.5 V .

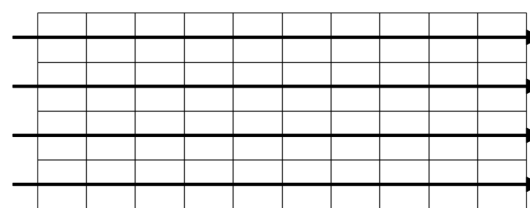


Figura 1. Módulo fotovoltaico de 40 celdas conformado por 4 strings

El comportamiento de la curva $I-V$ se ajusta mediante un parámetro de forma $n=1.30$, conocido como factor de idealidad del diodo. Este parámetro describe qué tan cercano es el comportamiento real de la celda respecto a un diodo ideal y está directamente relacionado con los procesos de recombinación de portadores dentro del dispositivo. Un valor de n superior a 1 indica que existen mecanismos de recombinación adicionales dentro de la celda, lo que modifica la curvatura de la curva $I-V$ y reduce el desempeño ideal esperado en la región de máxima potencia. En cuanto a los efectos térmicos, se consideran coeficientes típicos: $\alpha_{Voc} = -0.003/^{\circ}\text{C}$, que representa una disminución aproximada del 0.3% por cada grado centígrado en el voltaje de circuito abierto, y $\alpha_{Isc} = +0.0005/^{\circ}\text{C}$, que corresponde a un incremento de alrededor del 0.05% por grado centígrado en la corriente de cortocircuito.

La celda solar absorbe la radiación incidente y a partir de ella genera pares electrón-hueco en el material semiconductor. Los portadores son separados en la unión P-N gracias al potencial incorporado, lo que reduce la recombinación. El campo eléctrico dirige los electrones y huecos hacia los contactos metálicos, donde la energía se transforma en electricidad (Oni *et al.*, 2024). La celda fotovoltaica convierte directamente la energía lumínica en energía eléctrica como se muestra en la Figura 2.

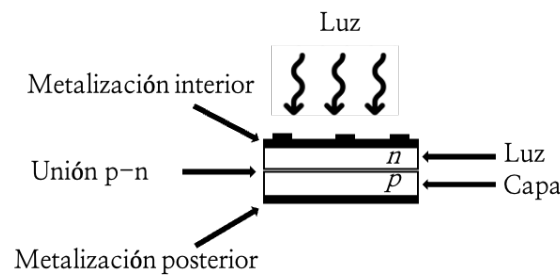


Figura 2. Estructura física de una célula fotovoltaica

Entorno de simulación

El esquema representa la estructura general del modelo electrotérmico utilizado para el análisis del comportamiento de un módulo fotovoltaico como se muestra en la Figura 3. La celda fotovoltaica, cuyos parámetros eléctricos y condiciones ambientales son irradiancia y temperatura, se integran en el modelo electrotérmico. El modelo permite obtener variables de salida como la corriente, voltaje, curvas $I-V$ y $P-V$, así como la distribución térmica del panel y la detección de hot-spots.

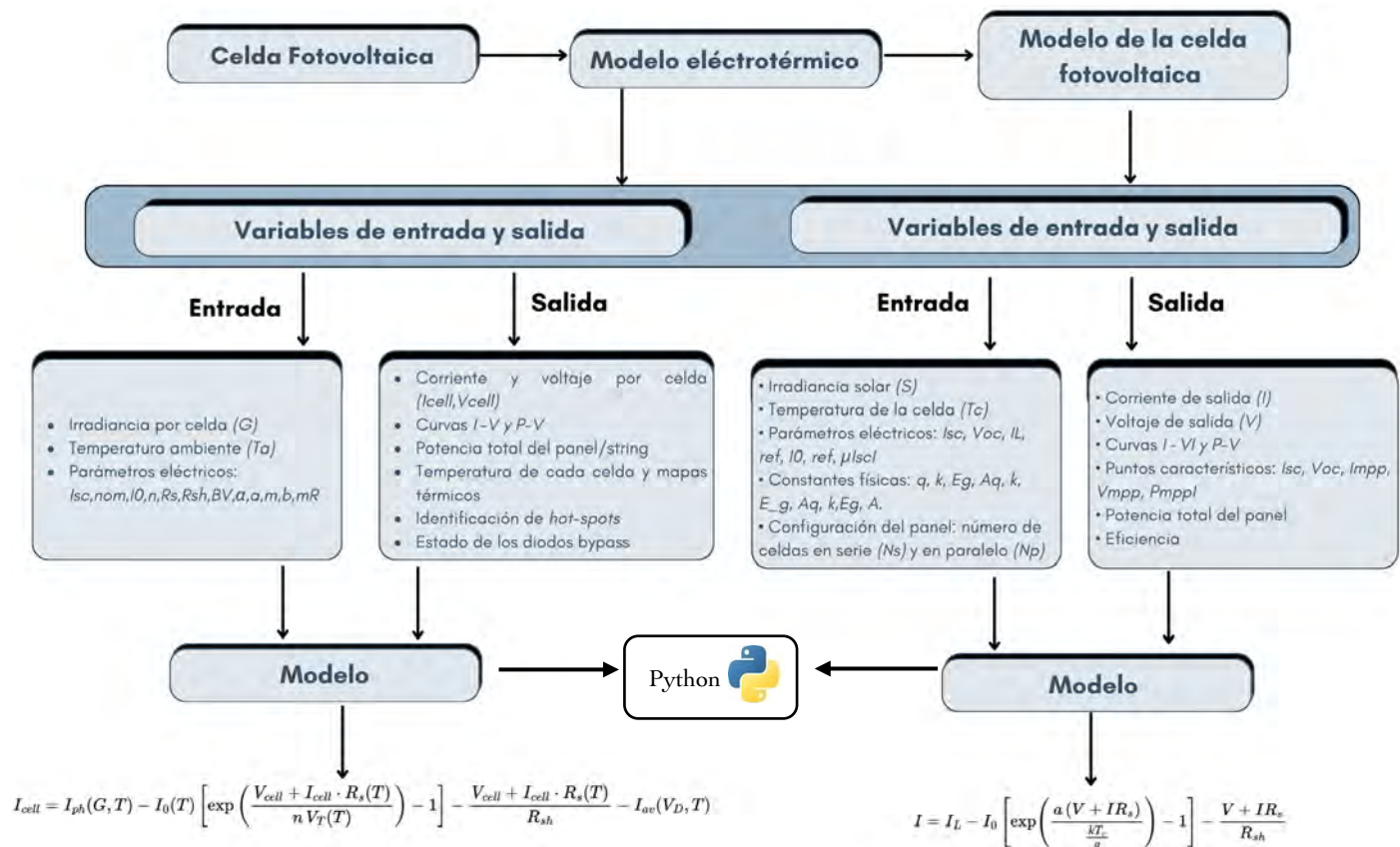


Figura 3. Esquema modular del sistema fotovoltaico en Python

Modelo electrotérmico

La Ecuación 1, donde I_{cell} es la corriente total generada por la celda, mientras que $I_{ph}(G, T)$ representa la corriente fotogenerada dependiente de la irradiancia G y la temperatura T . $I_0(T)$ es la corriente de saturación inversa del diodo, dependiente de la temperatura. V_{cell} es el voltaje de la celda, y $R_s(T)$ la resistencia serie que varía con la temperatura; R_{sh} es la resistencia shunt que modela las fugas internas. El parámetro n es el factor de idealidad del diodo, y $V_T(T) = KT/q$ el voltaje térmico. Finalmente, $I_{av}(V_D, T)$ es la corriente de avalancha asociada a la polarización inversa, $BV(T)$ el voltaje de ruptura dependiente de T , y a, m, b son parámetros de ajuste adimensionales.

$$I_{cell} = I_{ph}(G, T) - I_0(T) \left[\exp \frac{(V_{cell} + I_{cell} R_s(T))}{nV_T(T)} \right] - \frac{(V_{cell} + I_{cell} * R_s(T))}{R_{sh}} - I_{av}(VD, T) \quad (1)$$

Modelo de una celda fotovoltaica

La Ecuación 2, donde I es la corriente total de la celda o panel y V el voltaje entre sus terminales. I_L es la corriente fotogenerada, función de la irradiancia solar S y la temperatura de celda T_c , con valores de referencia S_{REF} e $S_{L,REF}$ y coeficiente térmico μISC . I_0 es la corriente de saturación inversa del diodo, dependiente cúbicamente de T_c y del ancho de banda prohibida E_G . R_s representa la resistencia serie y R_{sh} la resistencia en derivación. a es el factor de idealidad del diodo, K la constante de Boltzmann, q la carga del electrón y T_c , la temperatura de la celda en kelvin. Para un panel, se consideran N_s celdas en serie y N_p en paralelo (Villalva *et al.*, 2009)

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{a} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{SH}} \quad (2)$$

Modelo térmico del sistema

El modelo térmico considera que el calor generado en la celda Q_i se obtiene del producto entre la corriente I_i y el valor absoluto del voltaje $|V_i|$, equivalente a la potencia disipada. La temperatura resultante de la celda T_i se calcula sumando la temperatura ambiente T_{amb} y el incremento térmico producido por el calor disipado, ponderado por la resistencia térmica equivalente $R_{th,cell}$. Así, el modelo relaciona la potencia eléctrica con el aumento de temperatura, permitiendo estimar la formación de puntos calientes bajo condiciones de sombreado parcial como se muestra en la Ecuación 3 y 4.

$$Q_i = I_i * |V_i| \quad (3)$$

$$T_i = T_{amb} + R_{th,cell} * \quad (4)$$

Modelo de sombreado parcial

La expresión utilizada permite modelar cómo el sombreado parcial y la temperatura afectan la corriente generada por cada celda fotovoltaica. La ecuación ajusta la corriente de referencia en condiciones estándar considerando la irradiancia real que recibe la celda y una corrección asociada a la variación térmica. La disminución de corriente se refleja en zonas sombreadas y el impacto del calor en el rendimiento eléctrico del panel como se muestra en la Ecuación 5 (Guerriero *et al.*, 2019).

$$I_{ph,i} = I_{ph,STC} \frac{(G_i)}{G_{STC}} [1 + \alpha_{ISC}(T_i + T_{STC})] \quad (5)$$

Donde, la corriente fotogenerada de la celda bajo condiciones de sombreado parcial ($I_{ph,i}$) se obtiene a partir de la corriente de referencia en condiciones estándar ($I_{ph,STC}$), ajustada por el cociente entre la irradiancia efectiva de la celda (G_i) y la irradiancia de referencia (G_{STC}). A este término se añade una corrección por temperatura, donde (α_{ISC}) representa el coeficiente de variación de la corriente con la temperatura, considerando la diferencia entre la temperatura de operación de la celda (T_i) y la temperatura estándar de referencia (T_{STC}).

Escenarios de Simulación

El análisis estudió y analizó cuatro condiciones de operación. En el escenario uniforme, todas las celdas del módulo operaron bajo irradiancia homogénea de 1000 W/m², sin activación de diodos de bypass ni formación de puntos calientes. En el escenario de agrupamiento, un bloque continuo de celdas recibió irradiancia reducida y operó a mayor temperatura local, lo que provocó la activación de diodos de bypass y un descenso significativo de la potencia generada. En el escenario lateral, aproximadamente el 25 % del área del módulo fue sombreada en la esquina inferior izquierda,

ocasionando un incremento de hasta +12 °C en las celdas afectadas respecto al resto del módulo. Finalmente, en el escenario aleatorio, aproximadamente un 30 % de las celdas se vieron afectadas de forma dispersa lo que generó pérdidas de potencia de hasta un 40 % y un aumento considerable de la temperatura en las zonas sombreadas, incrementando el riesgo de formación de puntos calientes. Los sombreados parciales pueden visualizarse como se muestra en la Figura 4.

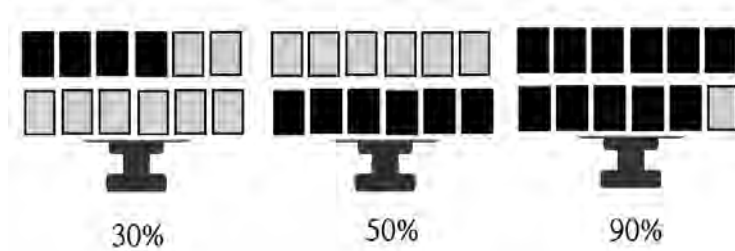


Figura 4. Representación de sombreado parcial en módulos fotovoltaicos

Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los principales hallazgos obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el modelo electrotérmico. Los resultados permiten analizar el comportamiento del módulo fotovoltaico bajo distintas condiciones de irradiancia y sombreado evaluando tanto las pérdidas de eficiencia como la formación de puntos calientes. Asimismo, se discuten las implicaciones de estos fenómenos en el rendimiento y la vida útil del panel.

Escenario uniforme

El escenario uniforme, las celdas del módulo (4×10) operan con irradiancia uniforme ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) y temperatura homogénea. La comparación entre 25 °C y 75 °C se muestran en la Figura 5, donde se visualiza la respuesta térmica pura del módulo: al aumentar la temperatura, el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) disminuye y el punto de máxima potencia (MPP) se desplaza hacia menor voltaje, reduciendo la potencia máxima (P_{mp}); la corriente de cortocircuito (I_{sc}) varía marginalmente.

Las curvas I-V y P-V no presentan escalones ni afectación en la salida, lo que confirma la no activación de los diodos de bypass y la ausencia de celdas en polarización inversa; por tanto, no se esperan puntos calientes. Este escenario uniforme se adopta como línea base para cuantificar las pérdidas en los casos con sombreado parcial.

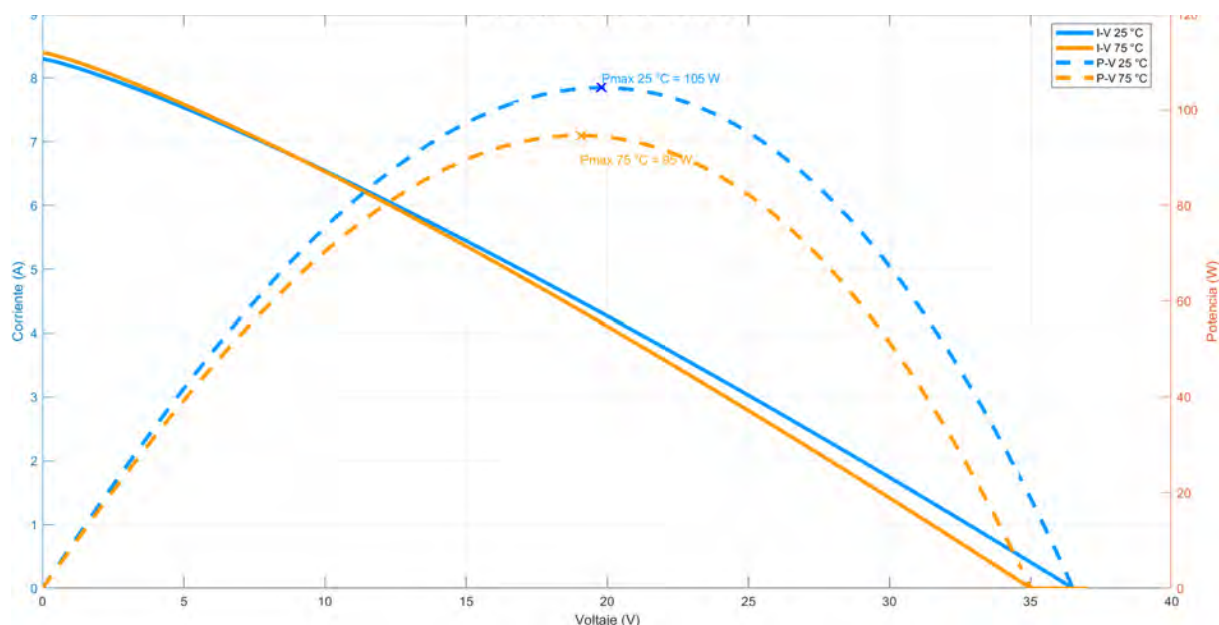


Figura 5. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico a 25 °C y 75 °C bajo escenario uniforme

Escenario de agrupamiento

El escenario de agrupamiento, es un bloque continuo de celdas que recibe irradiancia reducida y opera a mayor temperatura que el resto del módulo. En la curva I-V aparece un quiebre por la activación de diodos de bypass como se muestra en la Figura 6, y en la P-V se observa un hundimiento de potencia con desplazamiento del (MPP) a menor voltaje, más marcado a 75 °C dentro de la misma gráfica. El aumento de la temperatura de 25 °C a 75 °C provoca una disminución en la tensión de circuito abierto (Voc), una reducción en la potencia máxima (Pmp) y una variación mínima en la corriente de cortocircuito (Isc). El mapa térmico localiza el bloque caliente coincidente con la sombra, indicando mayor disipación y riesgo de hotspots como se muestra en la Figura 7. En conjunto, las gráficas cuantifican la pérdida de potencia y evidencian el acoplamiento electro-térmico del sombreado en grupo frente al caso uniforme.

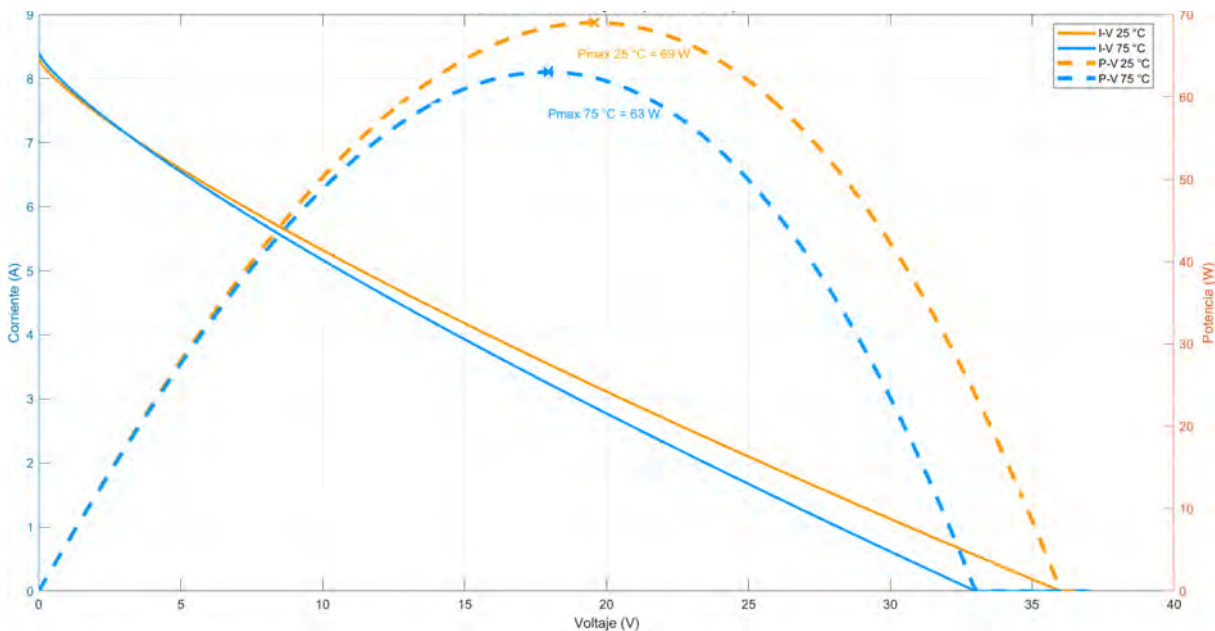


Figura 6. Curvas I-V y P-V del módulo fotovoltaico a 25 °C y 75 °C bajo escenario de agrupamiento

El mapa térmico muestra la distribución de temperatura en el módulo fotovoltaico bajo una condición de sombreado agrupado con una temperatura ambiente de 75 °C. Las celdas sombreadas del extremo derecho presentan un aumento localizado de temperatura, alcanzando aproximadamente 87 °C, mientras que el resto del módulo mantiene valores uniformes cercanos a 75 °C. El comportamiento indica la concentración de calor en un grupo de celdas afectadas, lo que favorece la aparición de puntos calientes (hotspots) y refleja un desequilibrio térmico asociado a la distribución irregular de corriente en el arreglo como se muestra en la Figura 7.

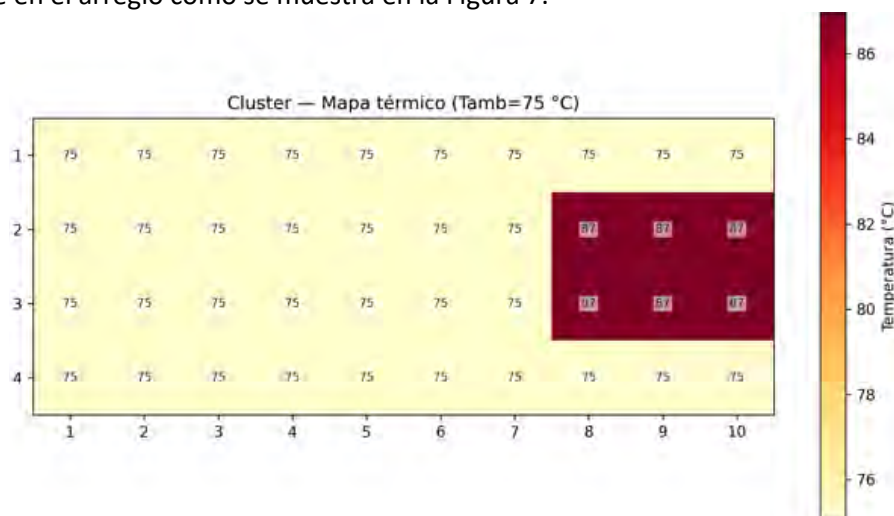
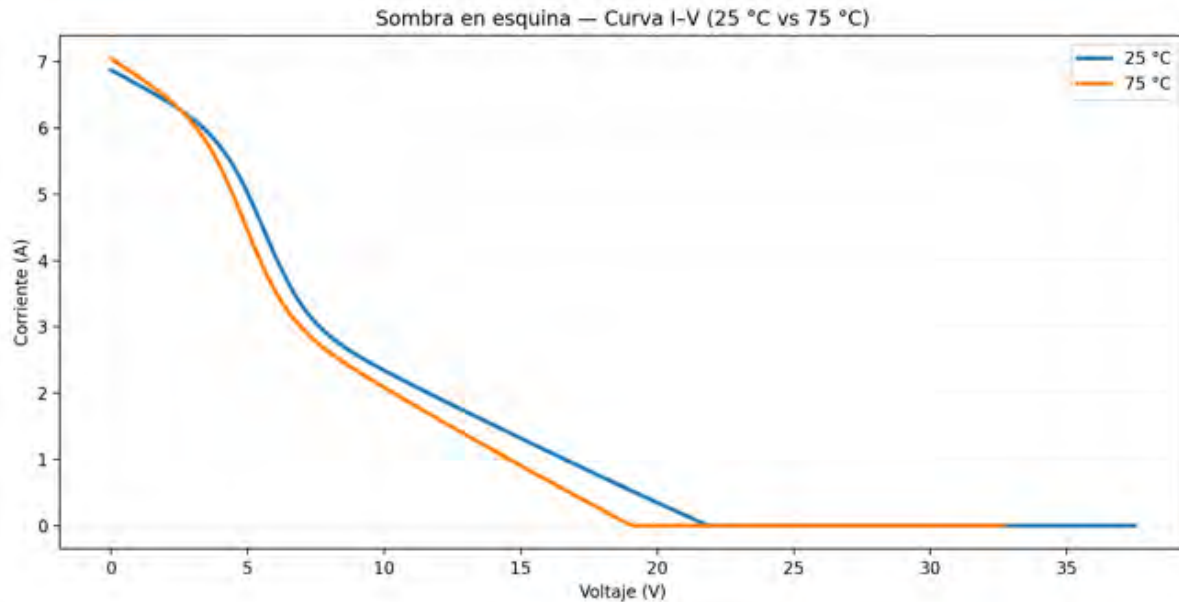


Figura 7. Mapa térmico (sombreado parcial, 75 °C)

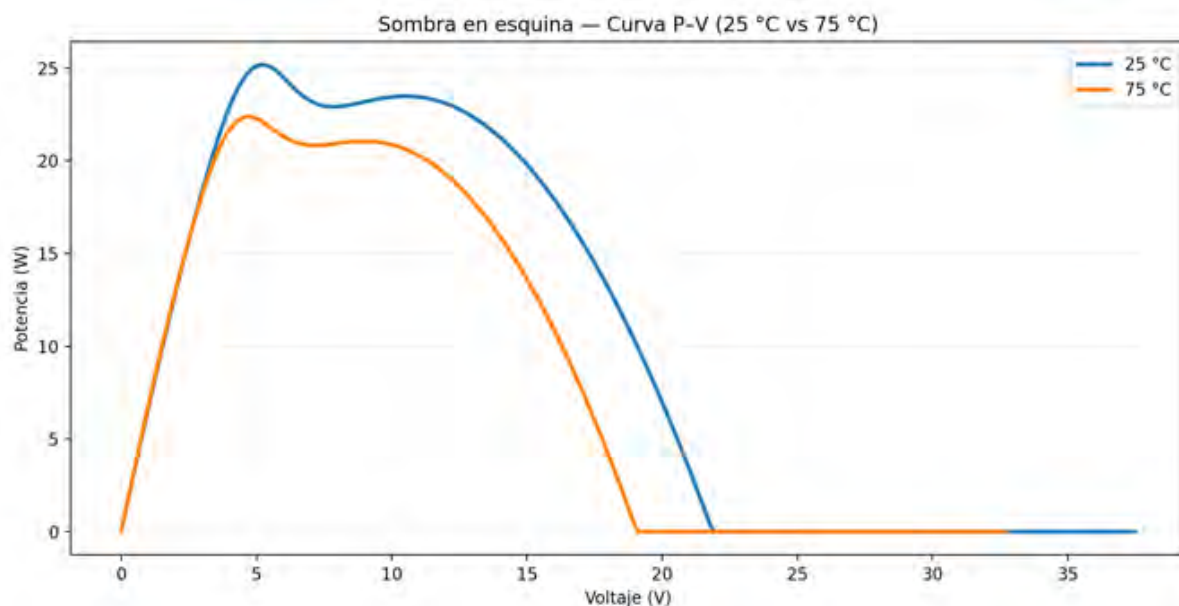
Escenario de sombreado parcial lateral

El escenario de sombreado parcial lateral, es un bloque de sombra fija que cubre la parte inferior izquierda del módulo, con 10 celdas aproximadamente el 25 % del área total, con irradiancia reducida a 200 W/m^2 . Las celdas sombreadas operan más calientes ($+12 \text{ }^\circ\text{C}$) que el resto por desajuste de corriente. En la curva I-V Figura 8(a), se observa una reducción de la corriente disponible y un pequeño “escalón” asociado a la activación del diodo de bypass en la subcadena afectada.

La curva P-V Figura 8(b), muestra el desplazamiento del MPP hacia menores voltajes y una disminución de P_{mp} respecto al caso uniforme. El mapa térmico Figura 9, confirma la concentración de calor en la esquina sombreada, coherente con la polarización inversa local y el riesgo de puntos calientes. Este patrón contrasta con el caso base, donde no se observan escalones.



(a)



(b)

Figura 8. (a). Curva I-V sombra parcial lateral (25 °C y 75 °C); (b). Curva P-V sombra parcial lateral (25 °C y 75 °C)

El mapa térmico muestra la distribución de temperatura en el módulo fotovoltaico bajo una condición de sombreado parcial lateral, con una temperatura ambiente de 75 °C. El incremento es notable en las celdas ubicadas en la esquina sombreada, alcanzando valores cercanos a 87 °C, mientras que el resto del módulo mantiene una temperatura uniforme de 75 °C. Este patrón evidencia la formación de puntos calientes (hotspots) en las zonas afectadas, consecuencia de la redistribución desigual de la corriente eléctrica dentro del arreglo fotovoltaico como se muestra en la Figura 9.

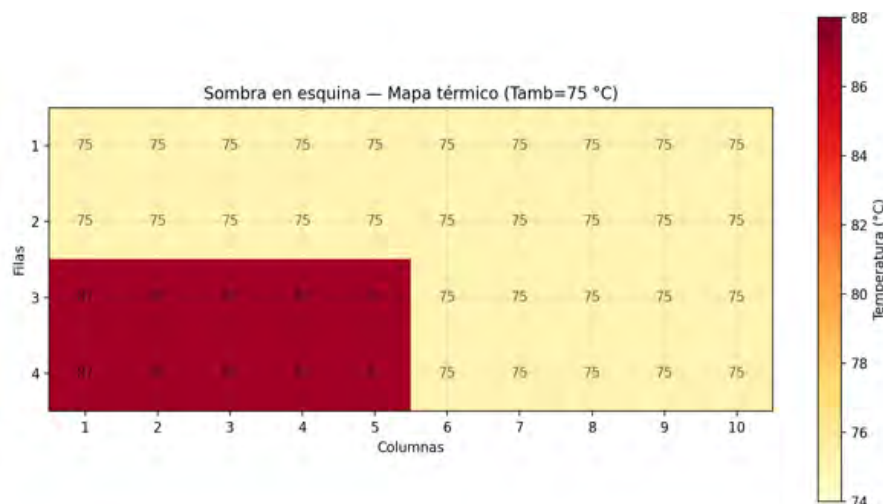


Figura 9. Mapa térmico — sombra parcial lateral ($T_{amb} = 75\text{ °C}$)

Investigaciones a futuro

A futuro, será necesario validar experimentalmente el programa propuesto, comparando sus resultados con datos reales de módulos fotovoltaicos bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura. También se plantea ampliar el análisis a sistemas de mayor escala, incorporando factores ambientales adicionales como polvo o humedad que influyen en la disipación térmica. La línea de investigación enfocada en este estudio puede abrir otra brecha donde consiste en proponer estrategias de mitigación mediante nuevas tecnologías, configuraciones de interconexión y técnicas de control térmico.

Desafíos térmicos y sombreado parcial en la transición hacia la sostenibilidad

El comportamiento térmico y el sombreado parcial representan retos en los sistemas fotovoltaicos donde influyen directamente en su eficiencia y en la estabilidad de su desempeño a largo plazo. En climas cálidos, el exceso de radiación solar eleva significativamente la temperatura de las celdas, reduciendo la potencia de salida y acelerando los procesos de degradación del material. Los patrones de sombreado no uniformes generan pérdidas por desbalance eléctrico y la aparición de puntos calientes, comprometiendo la fiabilidad del sistema. Estos fenómenos se incluyen dentro del contexto de la transición energética y la sostenibilidad al evidenciar que la optimización térmica y lumínica es esencial para maximizar la producción limpia y reducir la demanda energética auxiliar. Las estrategias inteligentes de gestión, como el uso de dispositivos de sombreado dinámico o el control adaptativo de operación, han demostrado reducir hasta un 32 % el consumo energético por enfriamiento y mantener niveles útiles de iluminación natural durante el 68 % del tiempo ocupado (Humaidan *et al.*, 2025). En conjunto, la mitigación del calor excesivo y del sombreado parcial contribuye a sistemas fotovoltaicos más eficientes, duraderos y sostenibles, alineados con los objetivos globales de descarbonización y eficiencia energética a largo plazo.

Conclusiones

El estudio realizado confirma que el desempeño de un módulo fotovoltaico depende de manera crítica de las condiciones de irradiancia, temperatura y de la uniformidad en la iluminación de sus celdas. En escenarios uniformes, la curva I-V conserva una forma estable y predecible, con pérdidas principalmente asociadas al incremento de temperatura que reduce el voltaje de circuito abierto (Voc) y desplaza el punto de máxima potencia (MPP). La

disminución se observa mucho más severa en la corriente de cortocircuito (I_{sc}), (V_{oc}) y por ende en potencia máxima, reduciendo la eficiencia del módulo hasta en un 40 %. El mapa térmico evidencia que las celdas sombreadas alcanzan temperaturas significativamente superiores al resto (hasta 12°C más) confirmando la aparición de puntos calientes que no solo limitan la potencia disponible, sino que también generan un riesgo de degradación prematuro. Este fenómeno subraya la importancia de considerar la distribución del sombreado parcial, incluso cuando la irradiancia total se mantiene en valores aceptables, además el patrón aleatorio de sombras puede alcanzar pérdidas desproporcionadas. La investigación demuestra que las variables eléctricas (I_{sc} , V_{oc} , MPP) y térmicas deben analizarse de manera conjunta para una evaluación realista del desempeño fotovoltaico. Los resultados reafirman que la mitigación de sombras parciales y el control térmico son aspectos clave para garantizar no solo la eficiencia de conversión, sino también la vida útil de los módulos.

Agradecimientos y financiamiento: El autor Irvin David Velásquez Mora agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada, la cual ha financiado sus estudios de doctorado y ha hecho posible el desarrollo del presente trabajo.

Bibliografía

- Bamisile, O., Cai, D., Adun, H., Dapbas, M., Ukwuoma, C. C., Huang, Q., Johnson, N., & Bamisile, O. (2025). Towards renewables development: Review of optimization techniques for energy storage and hybrid renewable energy systems. *Heliyon*, 10(19), e37482. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37482>
- Gayen, D., Chatterjee, R., & Roy, S. (2024). A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(5), 5285–5310. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05380-z>
- Guerriero, P., Codecasa, L., d'Alessandro, V., & Daliotto, S. (2019). Dynamic electro-thermal modeling of solar cells and modules. *Solar Energy*, 179, 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.067>
- Herrmann, D., Kratzert, P., Weeke, S., Zimmer, M., Djordjevic-Reiss, J., Hunger, R., Lindberg, P., Wallin, E., Lundberg, O., & Stolt, L. (2014). CIGS module manufacturing with high deposition rates and efficiencies. En *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6925505>
- Hudișteanu, V.-S., Cherecheș, N.-C., Turcanu, F.-E., Hudișteanu, I., & Romila, C. (2024). Impact of temperature on the efficiency of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic panels: A comprehensive experimental analysis for sustainable energy solutions. *Sustainability*, 16(23), 10566. <https://doi.org/10.3390/su162310566>
- Humaidan, O., Almazam, K., Bashir, F. M., Alshayeb, M. J., Al-Tamimi, N., & Dodo, Y. A. (2025). Evaluación integral de dispositivos de sombreado dinámico para la iluminación natural y la gestión energética en edificios cálidos y áridos de Arabia Saudita. *Energy and Buildings*, 346, 116180. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116180>
- Jackett, C. J., Barnard, K., Althaus, F., Mortimer, N., Webb, D., Untiedt, C., Tyndall, A., Jameson, I., Gorton, B., Devine, C., Strzelecki, J., Thrall, P. H., & Scoulding, B. (2025). Marimba: A Python framework for structuring and processing FAIR scientific image datasets. *SoftwareX*, 31, 102251. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102251>
- Le Bihan, J., Lapi, T., & Halloy, J. (2025). Beyond 2050: From deployment to renewal of the global solar and wind energy system. *arXiv preprint*, arXiv:2502.04205. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.04205>
- Oni, A. M., Mohsin, A. S. M., Rahman, M. M., & Bhuian, M. B. H. (2024). A comprehensive evaluation of solar cell technologies, associated loss mechanisms, and efficiency enhancement strategies for photovoltaic cells. *Energy Reports*, 11, 3345–3366. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.007>
- Sebestyén, V. (2021). Environmental impact networks of renewable energy power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111626>
- Sepúlveda-Oviedo, E. H. (2025). Impact of environmental factors on photovoltaic system performance degradation. *Energy Strategy Reviews*, 59, 101682. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101682>
- Shaik, F., Lingala, S. S., & Veerapbojna, P. (2023). Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: A review and experimental study. *Sustainable Energy Research*, 10(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40807-023-00076-x>
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Ruppert Filho, E. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), 1198–1208. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>

Identificación de microplásticos en efluentes y afluentes de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal

Flor Idalia Tirado Aguilar ^{1*}, Humberto Raymundo González Moreno ¹ y Carolina Peña Montes ²

¹ Laboratorio de Microplásticos, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Misantla, Veracruz, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México.

² Unidad de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, MA de Quevedo 2779, Veracruz 91897, México

* Autor de correspondencia: floridaliatirado1608@gmail.com; Tel.: (235)1034997

Desarrollo Sustentable (Humedales naturales y construidos)

Recibido: Aceptado: Publicado:

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.639>

Resumen: Los microplásticos (MP) se han popularizado debido a su presencia en todos los entornos y ha sido definido como un contaminante nocivo, biomagnificador y bioacumulador; se ha reportado la presencia de MP en aguas residuales domésticas, mismas que se utilizan para el riego de cultivos agrícolas. El transporte, almacenamiento y destino final de los MP aún se desconocen. Los MP en aguas residuales son un problema poco conocido, más aún cuando se integran a la cadena alimenticia. El objetivo de este estudio es identificar la presencia de MP en Agua Residual Doméstica tratada mediante Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal con plantas ornamentales (*Hippeastrum hybridum hort* y *Heliconia bihai marginata*) mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y caracterización visual. La presencia de MP se identificó mediante análisis FTIR, la caracterización visual mediante la metodología de Peralta-Peláez (2023) y la clasificación de MP se realizó mediante la metodología de Crawford (2017). Las muestras analizadas mediante FTIR mostraron que este tipo de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante Humedales Construidos puede retener los siguientes tipos de polímeros: PP, PS, PT y PTFE. Sin embargo, estas muestras de agua tratada aún contenían polímeros de PU, EVA, PA, PET y PMMA, lo que sugiere que estos polímeros se desplazan a través del flujo de aguas residuales entre el sustrato y las raíces de las plantas. Es probable que este transporte se vea influenciado por el tamaño de las partículas, el tipo de flujo en el sistema de Humedales. En las muestras de agua residual doméstica tratada, se detectaron 11 fibras y 6 fragmentos de MP por cada 500 ml de agua. Si bien no se cuantificó la eficiencia de eliminación y/o retención, estos hallazgos sugieren que el sistema de HC de flujo subsuperficial horizontal condicionado con plantas ornamentales tienen el potencial de retener MP.

Palabras clave: Microplásticos, Humedales Construidos, Aguas residuales domésticas

Identification of microplastics in effluents and influents of horizontal subsurface flow constructed wetlands

Abstract: Microplastics (MPs) have become widespread due to their presence in all environments and have been defined as harmful, biomagnifying, and bioaccumulative contaminants. The presence of MPs has been reported in domestic wastewater, which is often reused for irrigation of agricultural crops. However, the transport, storage, and final fate of MPs remain poorly understood. MPs in wastewater represent an underexplored environmental problem, particularly when they enter the food chain. The objective of this study is to identify the presence of MPs in domestic wastewater treated by horizontal subsurface flow constructed wetlands planted with ornamental species (*Hippeastrum hybridum hort* and *Heliconia bihai marginata*), using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and visual characterization. The presence of MPs was identified through FTIR analysis, visual characterization was conducted following the methodology proposed by Peralta-Peláez (2023), and MP classification was performed according to the methodology of Crawford (2017). FTIR analysis of the samples showed that this type of domestic wastewater treatment using constructed wetlands can retain the following polymer types: PP, PS, PT, and PTFE. However, the treated water samples still contained polymers such as PU, EVA, PA, PET, and PMMA, suggesting that these polymers are transported through the wastewater flow between the substrate and plant roots. This transport is likely influenced by particle size and the type of flow within the constructed wetland system. In the treated domestic wastewater samples, 11 fibers and 6 MP fragments were detected per 500 mL of water. Although removal and/or retention efficiency was not quantified, these findings suggest that horizontal subsurface flow constructed wetlands conditioned with ornamental plants have the potential to retain MPs.

Keywords: Microplastics, Constructed Wetlands, Domestic Wastewater

Introducción

Los MP se suman a una serie de problemas existentes que atacan y afectan a los ecosistemas y a la salud humana/animal, es considerado como un contaminante emergente ubicuo (Al-Azzawi *et al.*, 2020), nocivo,

biomagnificador y bioacumulador (Andrady, 2022) que puede ocasionar daño en el ADN, daño celular e inflamación (Vethaak *et al.*, 2021) atribuyendo estas características a sus diversas formas (películas, fibras, fragmentos y esferas) y composiciones (poliestireno (PE), polietileno (PE), polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), cloruro de polivinilo (PVC), poliamida (PA) y acrílicos) (Castañeta *et al.*, 2020), mayormente estudiados en la fauna acuática (Mansoor *et al.*, 2023), reportado también, como responsable de afectar la estructura del suelo, su porosidad y capacidad de retención de agua (Bläsing & Amelung, 2018), además de su presencia en aguas residuales, aunado a esto, el transporte de los MP en suelos y aguas subterráneas, su migración y destino aún se desconoce (Zhang *et al.*, 2022); estos hechos conllevan a suponer su integración y presencia en los cultivos agrícolas como consecuencia de las prácticas comunes en la agricultura y la irrigación de los cultivos con aguas residuales domésticas sin tratar, una situación frecuente en México, donde el 85% de los cultivos reciben este tipo de riego (Mendoza *et al.*, 2021).

Esto ha llevado a algunos investigadores a intentar eliminar los MP de las aguas residuales mediante plantas de tratamiento tradicionales (PTAR), pero los MP permanecen intactos en el agua después del tratamiento, debido a que originalmente no fueron diseñadas para ese propósito (Muños *et al.*, 2014). Otros trabajos de investigación se han centrado en soluciones basadas en la naturaleza, como los Humedales Construidos (HC), que han demostrado ser útiles para limpiar aguas residuales industriales y domésticas, incluso aguas residuales de mataderos (Rivera *et al.*, al 2023). Dadas sus características de eliminación (físicas, químicas y biológicas), los HC se consideraron una posible alternativa para eliminar con éxito los MP. Recientemente se informó que los HC de flujo subsuperficial retienen MP, con una eficiencia de hasta 98,13% (Chen *et al.*, 2021), sin embargo, algunos estudios los colocan como tratamiento secundario o terciario (García *et al.*, 2023; Komorowska, *et al.*, 2024). El tipo de flujo utilizado con mayor frecuencia es el subsuperficial horizontal (Nani *et al.*, 2024), y también se ha destacado que, la adecuación de las plantas ornamentales en los sistemas de humedales es un elemento clave en la eficiencia de eliminación de contaminantes comunes en aguas residuales, bajo este contexto, el objetivo de este estudio fue identificar la presencia de MP en Agua Residual Doméstica tratada mediante Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal con plantas ornamentales (*Hippeastrum hybridum hort* y *Heliconia bihai marginata*) mediante FTIR y caracterización visual.

Materiales y Métodos

En esta sección se describen por etapas los materiales y métodos empleados para el estudio:

Etapas 1. Instalación del sistema de humedal construido de flujo subsuperficial horizontal

El sistema de humedales está compuesto por ocho celdas horizontales de flujo subsuperficial en cajas de plástico con un volumen útil de 68 L (dimensiones: largo 41 cm, ancho 59 cm y alto 41 cm), rellenas con sustrato de roca de tezontle rojo de 8 mm de diámetro y aproximadamente 40% de porosidad, previamente tamizadas, se adaptaron con dos tipos diferentes de plantas ornamentales, *Hippeastrum hybridum hort* y *Heliconia bihai marginata*, además de acondicionar celdas de policultivo y control (sin plantar); el tiempo de retención hidráulica fue de 5 días. Este sistema se alimenta mediante un mecanismo de tuberías acoplado a un contenedor de 100 L, que se llena semanalmente con aguas residuales domésticas, provenientes del alcantarillado que corre a 15 m del área experimental. El sistema de humedales está compuesto por dos celdas sembradas con *Hippeastrum hybridum hort*, dos celdas con *Heliconia bihai marginata*, dos con policultivo y dos celdas control, y cabe mencionar que, debe pasar por un período de adaptación (un mes), el cual es esencial para asegurar que la planta ornamental se adapte a su nuevo ecosistema.

Etapas 2. Análisis mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Para su identificación química, se aplicó la técnica de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), se utilizó un espectrofotómetro equipado con un módulo Perkin Elmer ATR con un cristal de diamante y un área de muestreo de 1,5 mm en una ventana óptica de 400 a 3500 cm⁻¹ para identificar el o los tipos de polímeros (Käppler *et al.*, 2016). Sin embargo, previamente se necesitó realizar un pretratamiento para cada muestra de agua, el pretratamiento con llevó los siguientes pasos:

1. Muestreo: Se utilizó un recipiente de vidrio estéril de 500 ml con tapa metálica.

2. Digestión de la materia orgánica: utilizando hidróxido de potasio y un termoagitador durante 24 h a una temperatura de 50 °C, se logró la digestión de la materia orgánica de cada muestra de agua.
3. Sedimentación: cuarenta y ocho horas después de la digestión de la materia orgánica, las muestras fueron transferidas a tubos de ensayo de vidrio de 60 ml con tapa, utilizando una pipeta de vidrio previamente marcada con una etiqueta de identificación.

Etapa 3. Caracterización visual

Se necesitó contar con los siguientes equipos y consumibles para llevar a cabo la metodología de filtración de las muestras de agua de los HC y Agua Residual Doméstica:

Tabla 1. Enlistado de equipos y combustibles necesarios para la implementación de la metodología de filtración

Equipos/consumibles	Descripción
Suministros de filtración	• Portafiltros Swinnex Filter Holder de 47mm • Filtros de celulosa o fibra de vidrio de 47mm • Pinzas de punta fina • Vaso de precipitados • Jeringas de 60 ml • Placa de Petri • Microscopio óptico • Estereoscopio
Proceso de filtración	Todo material debe ser y/o estar esterilizado  La muestra se vierte en un vaso de precipitado, el filtro se coloca en el portafiltros y el portafiltros se coloca en el recipiente de muestra; para suministrar la muestra de agua con la ayuda de la jeringa, se retira el filtro con las pinzas y se coloca en una placa de Petri y se marca para su identificación
Proceso de secado	• Área seca a temperatura ambiente (26-35°C) El tiempo de secado del filtro es de 24 h. 
Proceso de visualización	El filtro se visualiza mediante un microscopio óptico y un microscopio estereoscópico modelo VE S-1, marca VELAB, con diferentes objetivos de lente (aumentos, 2× y 4×).

Resultados y Discusión

El sistema de humedales

Para fines prácticos y metodológicos de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-003-1980, Aguas residuales-Muestreo. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980. La toma de muestra de aguas residuales tratadas fueron recolectadas 12 hrs antes de su transporte al laboratorio.

Análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Para cada tipo de agua analizada (a = aguas residuales domésticas, b = aguas residuales domésticas tratadas mediante Humedales Construidos), los resultados se muestran en gráficos (Figura 1). Los rangos se interpretaron con base en los hallazgos de la literatura (Käppler *et al.*, 2016).

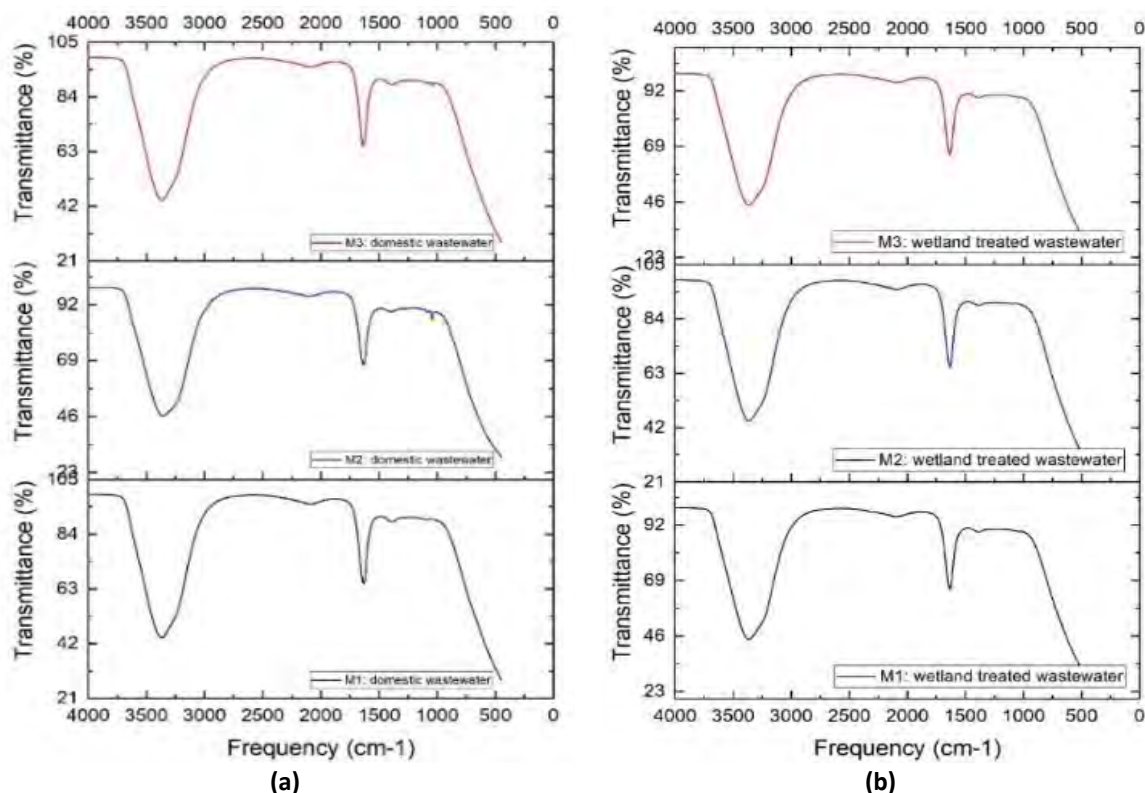


Figura 1. Análisis espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FIR)

La tabla 2 describe los picos prominentes en los rangos de polímeros reportados. En el análisis de las tres muestras de agua residual doméstica y tres muestras de agua residual tratada por HC (a: M1, M2 y M3; b: M1, M2 y M3), los resultados del FTIR permitió la identificación de polímeros en las seis muestras.

Tabla 2. Rangos del análisis FTIR

(a) Aguas residuales domésticas		
Muestra N°	Rango	Polímero
M1	1633	PU, EVA, PA, PET y PMMA
	1400–1480	PP, PS, PET y PA
M2	1634	PU, EVA, PA, PET y PMMA
	1044	PTFE
M3	1634	PU, EVA, PA, PET y PMMA

Tabla 2 (Continuación). Rangos del análisis FTIR

(b) Aguas residuales domésticas tratadas en humedales construidos		
Muestra N°	Rango	Polímero
M1	1633	PU, EVA, PA, PET y PMMA
M2	1633	PU, EVA, PA, PET y PMMA
M3	1633	PU, EVA, PA, PET y PMMA

Caracterización visual

Según la clasificación de Crawford *et al.* 2017 y de acuerdo con la metodología para la caracterización visual de Peralta-Peláez, 2023, clasificamos nuestros hallazgos como se describe en la Tabla 3. Los MP se clasificaron por color y forma. El total de partículas microplásticas en forma de fibra alcanzó una concentración de 11 partículas por medio litro de agua (500 ml) y la de partículas microplásticas en forma de fragmentos fue de 6 por medio litro de agua.

Tabla 3. Clasificación de Microplásticos

Muestra	Cantidad	Color	Forma
Aguas residuales domésticas	1	Púrpura	Fibra
Aguas residuales domésticas	2	Rojo	Fibra
Aguas residuales domésticas	5	Azul cielo	Fragmento
Aguas residuales domésticas	11	Azul marino	Fibra
Aguas residuales domésticas	6	Transparente	Fragmento
Aguas residuales domésticas	2	Blanco	Fragmento
Celda 8	1	Azul cielo	Fragmento
Celda 8	2	Rojo	Fragmento
Celda 7	2	Azul marino	Fragmento
Celda 6	0	NE	NE
Celda 5	0	NE	NE
Celda 4	0	NE	NE
Celda 3	1	Azul marino	Fibra
Celda 2	0	NE	NE
Celda 1	1	Azul marino	Fibra

Las imágenes de la Figura 2 son de los filtros agua tratada de cada una de las celdas de los Humedales Construidos, tanto de las aguas residuales domésticas sin tratar.

Conclusiones

Las muestras analizadas por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) mostraron que este tipo de tratamiento de aguas residuales domésticas puede eliminar o retener los siguientes tipos de polímeros: polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Politetrafluoroetileno (PTFE). Sin embargo, estas muestras de agua tratada todavía contenían polímeros de Poliuretano (PU), Etileno Acetato de Vinilo (EVA), poliamida (PA), polietileno (PE), y Polimetilmetacrilato (PMMA), lo que sugiere que estos polímeros se mueven a través del flujo de aguas residuales entre el sustrato y las raíces de las plantas ornamentales. Es probable que este transporte esté influenciado por el tamaño de las partículas, y el tipo de flujo subsuperficial horizontal en el sistema de humedales.

En este estudio se identificó que el sistema de humedales construidos de flujo subsuperficial retiene partículas microplásticas, de acuerdo con la caracterización visual, en cuatro de ellas no se visualizaron microplásticos (2, 4, 5 y 6), sin embargo, las celdas 1 y 3 (*Hippeastrum hybridum hort*, *Heliconia bihai marginata* respectivamente) encontraron

microplásticos en forma de fibras azules. En las celda 7 y 8 (sin plantas) se observaron fibras microplásticas rojas y azules.

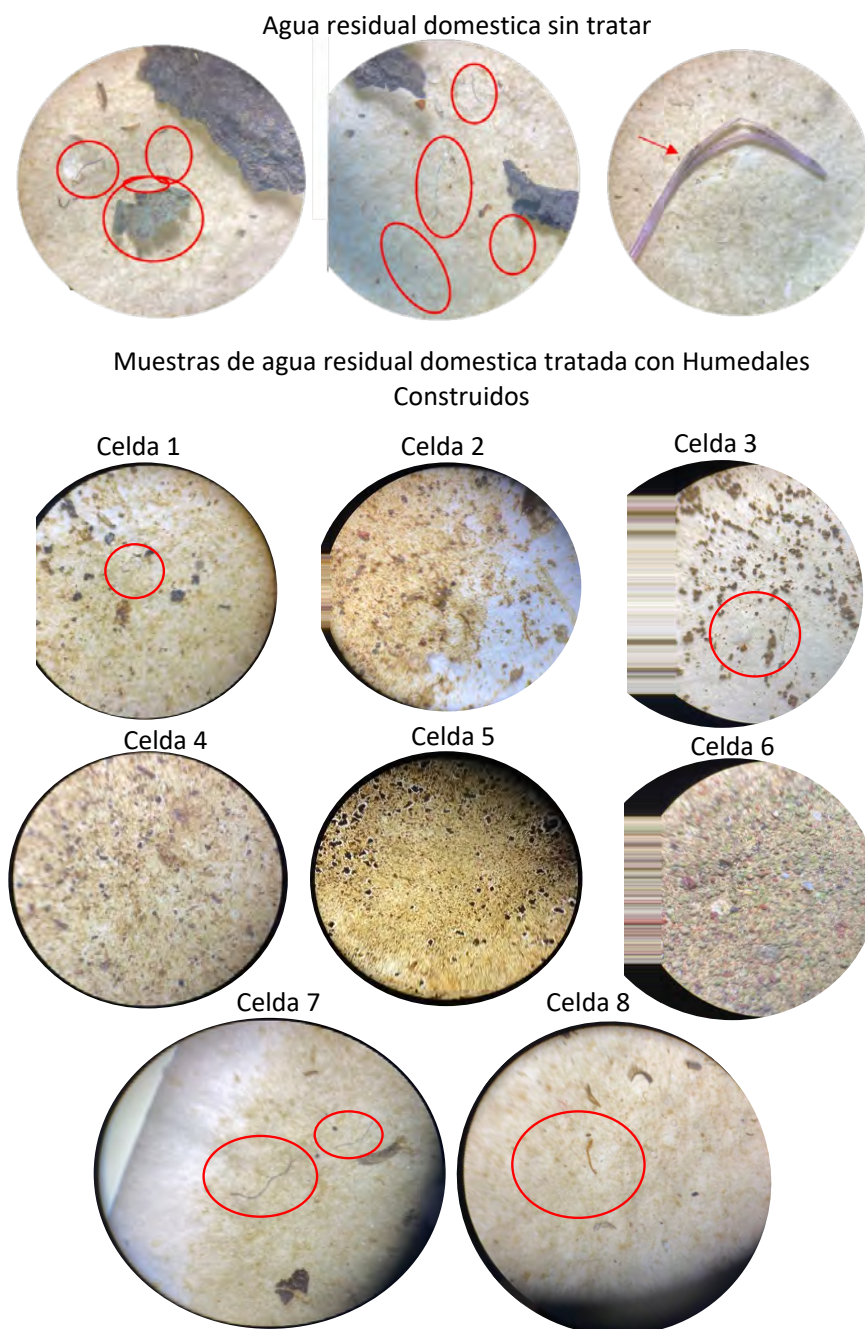


Figura 2. Identificación visual de Microplásticos

En las muestras de agua tratada, se detectaron 11 fibras y 6 fragmentos de microplásticos por cada 500 ml de agua. Si bien no se cuantificó la eficiencia de eliminación, estos hallazgos sugieren que los Humedales Construidos de flujo subsuperficial horizontal con plantas ornamentales tienen el potencial de retener microplásticos en sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales.

Al identificar los MPs en las aguas residuales domésticas, las aguas residuales domésticas tratadas con humedales construidos utilizando FTIR y la caracterización visual a través de los filtros analizados, este estudio contribuye a la investigación que posiciona a los humedales construidos como ecotecnologías eficientes para la remoción y/o eliminación de MP.

Agradecimientos y financiamiento: Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

Bibliografía

- Al-Azzawi, M. S. M., Kefer, S., Weißer, J., Reichel, J., Schwaller, C., Glas, K., Knoop, O., & Drewes, J. E. (2020). Validation of sampling-preparation methods for microplastics analysis in wastewater matrices: Reproducibility and standardization. *Water*, 12, 2445. <https://doi.org/10.3390/w12092445>
- Andrady, A. L. (2017). Plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Dick Vethaak, A., & Legler, J. (2021). Microplastics and human health: A need to bridge the gap for risk assessment. *Science*, 371, 672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>
- Castañeta, G., Gutiérrez, A. F., Nacaratte, F., & Manzano, C. A. (2020). Microplásticos: Un contaminante creciente en todos los entornos ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *Revista Boliviana de Química*, 37, 160–175. <https://www.redalyc.org/journal/4263/426365043004/426365043004.pdf>
- Arshad, N., Alam, M. M., Su'ud, M. B. M., Imran, S., Siddiqui, T., Saleem, K., Bashir, A., & Batool, A. (2023). Microplastics contamination in surface waters and commercially valuable fish along the coast of Karachi, Pakistan. *Regional Studies in Marine Science*, 62, 102955. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102955>
- Bläsing, M., & Amelung, W. (2018). Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of the Total Environment*, 612, 422–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>
- Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., & Sillanpää, M. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Journal of Earth Science Reviews*, 203, 103118. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>
- Mendoza-Retana, S. S., Cervantes-Vázquez, M. G., Valenzuela-García, A. A., Guzmán-Silos, T. L., Orón-Castillo, I., & Cervantes-Vázquez, T. J. Á. (2021). Potential use of wastewater in agriculture. *Revista Mexicana de Ciencias Agropecuarias*, 12(1), 115–126. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2789>
- Chen, Y., Li, T., Hu, H., Ao, H., Xiong, X., Shi, H., & Wu, C. (2021). Transport and fate of microplastics in constructed wetlands: A microscopic study. *Journal of Hazardous Materials*, 415, 125615. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125615>
- García-Ávila, F., Avilés-Añazco, A., Cabello-Torres, R., Guanuchi-Quito, A., Cadmé-Galabay, M., Gutiérrez-Ortega, H., Álvarez-Ochoa, R., & Zhindón-Arévalo, C. (2023). Application of ornamental plants in constructed wetlands for wastewater treatment: A scientometric analysis. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100307. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100307>
- Komorowska-Kaufman, M., & Marciniak, W. (2024). Removal of microplastic particles during municipal wastewater treatment: A current review. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100006>
- Nani, G., Sandoval-Herazo, M., Martínez-Reséndiz, G., Marín-Peña, O., Zurita, F., & Sandoval-Herazo, L. C. (2024). Influence of bed depth on the growth of tropical ornamental plants in subsurface flow constructed wetlands for municipal wastewater treatment: A pilot case. *Plants*, 13, 1958. <https://doi.org/10.3390/plants13141958>
- Käppler, A., Fischer, D., Oberbeckmann, S., Schernewski, G., Labrenz, M., Eichhorn, K.-J., & Voit, B. (2016). Environmental microplastics analysis by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman, or both? *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408, 8377–8391. <https://doi.org/10.1007/s00216-016-9956-3>
- Sandoval-Herazo, L., Alvarado-Lassman, A., Marín-Muñiz, J., Méndez-Contreras, J., & Zamora-Castro, S. A. (2018). Effects of the use of ornamental plants and different substrates in the removal of wastewater pollutants through microcosms of constructed wetlands. *Sustainability*, 10, 1594. <https://doi.org/10.3390/su10051594>
- Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). *Microplastic Pollutants*. Elsevier Science: Ámsterdam, Países Bajos. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04315-5>

Certificaciones y distintivos de sostenibilidad como herramientas estratégicas para las MiPyMEs mexicanas

Delvis Estrada-Ruiz, Rosa-Olivia Maquinay-Díaz *, Alicia Martínez-Rebollar, Daniela Hernández-Castañeda, Emmanuel Olmos-Barba

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.

* Autor de correspondencia: olivia.md@cenidet.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Desarrollo de Procesos Sustentables)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 31 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.612>

Resumen: Las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPyMEs) representan un pilar fundamental en la economía mexicana. Sin embargo, estas empresas enfrentan retos que les dificultan la incorporación de prácticas sostenibles en sus operaciones, como el acceso a tecnologías, los altos costos y la resistencia interna al cambio. En este contexto, las certificaciones y distintivos en sostenibilidad como: *ISO 14001:2015*, *B Corp*, Premio a la Equidad de Género, Empresa Socialmente Responsable, entre otros, pueden ser vistas como herramientas estratégicas que permiten evaluar y fortalecer el impacto económico, social y ambiental de estas organizaciones. En este artículo se presenta un análisis de las diferentes certificaciones y distintivos de sostenibilidad que pueden ser utilizados como herramientas estratégicas para las empresas con el propósito de mostrar cómo estos reconocimientos pueden facilitar la gestión integral de sus impactos en las organizaciones. Una revisión documental en bases de datos académicas como *Dialnet*, *Elsevier*, *Emerald*, *Google Scholar*, así como en documentos oficiales y convocatorias recientes, de los últimos cinco años, fue llevada a cabo. Los resultados mostraron que estas herramientas aportan beneficios como legitimidad, acceso a mercados y fortalecimiento de la gestión interna, aunque su adopción sigue limitada por factores de costo, complejidad y falta de acompañamiento técnico. Por otro lado, los distintivos nacionales están enfocados en fortalecer la confianza social y la visibilidad empresarial, mientras que las certificaciones internacionales ofrecen mayor competitividad global, aunque con mayores exigencias de recursos. Se concluye que las certificaciones constituyen un mecanismo valioso para potenciar la competitividad y resiliencia de las MiPyMEs mexicanas, pero requieren de políticas públicas, incentivos y apoyos específicos para garantizar su accesibilidad.

Palabras clave: sostenibilidad, certificaciones, MiPyMEs, responsabilidad social corporativa, Objetivos de Desarrollo Sostenible

Sustainability certifications and distinctions as strategic tools for Mexican MSMEs

Abstract: Micro, small, and medium-sized enterprises (MSMEs) are a fundamental pillar of the Mexican economy. However, these enterprises face challenges that make it difficult for them to incorporate sustainable practices into their operations, such as access to technology, high costs, and internal resistance to change. In this context, sustainability certifications and distinctions such as *ISO 14001:2015*, *B Corp*, *Gender Equality Award*, *Socially Responsible Company*, among others, can be seen as strategic tools to evaluate and strengthen the economic, social, and environmental impact of these organizations. This article presents an analysis of the different sustainability certifications and distinctions that can be used as strategic tools for companies to show how these recognitions can facilitate the comprehensive management of their impacts on organizations. A documentary review was carried out in academic databases such as *Dialnet*, *Elsevier*, *Emerald*, *Google Scholar*, as well as in official documents and recent calls for proposals from the last five years. The results showed that these tools provide benefits such as legitimacy, access to markets, and strengthening of internal management, although their adoption remains limited by factors such as cost, complexity, and lack of technical support. On the other hand, national distinctions focus on strengthening social trust and business visibility, while international certifications offer greater global competitiveness, albeit with greater resource requirements. It is concluded that certifications are a valuable mechanism for enhancing the competitiveness and resilience of Mexican MSMEs, but they require specific public policies, incentives, and support to ensure their accessibility.

Keywords: sustainability, certifications, MSMEs, corporate social responsibility, Sustainable Development Goals

Introducción

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se sustentan en tres pilares interrelacionados: económico, ambiental y social. Su cumplimiento, previsto para el año 2030, requiere de la acción coordinada de todos los países (Al-ahdal *et al.*, 2024). La Asamblea General de la ONU presentó

una agenda de desarrollo sostenible que integra 17 objetivos y 169 metas orientadas a abordar desafíos globales como la pobreza, la desigualdad, la paz, el cambio climático y la justicia social.

En las últimas décadas, la sostenibilidad se ha consolidado como un eje transversal en múltiples disciplinas académicas, dada su relevancia para conservar los recursos naturales, mitigar los efectos del cambio climático, proteger el medio ambiente, promover la equidad social, garantizar la estabilidad económica, mejorar la salud y el bienestar, fortalecer la resiliencia ante crisis y fomentar un sentido de responsabilidad global (Bali Swain y Yang-Wallentin, 2020; Du *et al.*, 2024). El logro de los ODS demanda la acción coordinada de empresas y organizaciones civiles, con el fin de construir un modelo de prosperidad inclusivo y respetuoso con el medio ambiente y la sociedad; logrando así generar riqueza. Sin embargo, el avance del sector empresarial hacia la sostenibilidad continúa siendo limitado (Van der Waal y Thijssens, 2020).

Las micro, pequeñas y medianas empresas (MiPyMEs) representan un pilar fundamental en las economías nacionales, contribuyendo significativamente al empleo y al Producto Interno Bruto (PIB). En el caso de México, alrededor del 97% de las unidades económicas corresponden a este tipo de empresas, las cuales aportan más del 70% al empleo formal (INEGI, 2020; Zavaleta González y Rodríguez Medina, 2024). No obstante, a pesar de su relevancia económica, enfrentan múltiples retos para integrar modelos más responsables en sus operaciones como el acceso limitado a financiamiento, la adopción insuficiente de tecnologías, altos costos y falta de capacitación del personal.

En este escenario, las certificaciones de sostenibilidad surgen como instrumentos estratégicos que validan y fomentan el compromiso empresarial con prácticas responsables. Sin embargo, el costo y los requisitos asociados a su obtención constituyen barreras para muchas MiPyMEs.

Este trabajo analiza mediante la revisión de la literatura diversas certificaciones y distintivos de sostenibilidad que pueden funcionar como herramientas estratégicas para las micro, pequeñas y medianas empresas mexicanas, con el propósito de comprender de qué manera estos reconocimientos contribuyen a facilitar una gestión integral del impacto económico, social y ambiental en dichas organizaciones.

Este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: la sección de Materiales y Métodos describe el enfoque documental-analítico empleado para identificar y analizar las certificaciones y distintivos de sostenibilidad. Posteriormente, se caracterizan los principales reconocimientos, así como los retos y beneficios que enfrentan las empresas para su adopción. El estudio continúa con los Resultados y Discusión, donde se realiza un análisis comparativo de las certificaciones y distintivos. Asimismo, se proponen líneas de trabajo futuro para facilitar la integración de estas herramientas estratégicas en las MiPyMEs mexicanas. Finalmente, la sección de Conclusiones presenta los hallazgos principales del estudio.

Materiales y Métodos

Este estudio empleó un enfoque documental-analítico basado en una revisión bibliográfica y de fuentes oficiales, como sitios web de organismos gubernamentales. El alcance de la investigación se limitó al análisis de algunas de las certificaciones y distintivos de sostenibilidad relevantes para las MiPyMEs mexicanas. La documentación del análisis se realizó de manera narrativa, con el propósito de caracterizar estos reconocimientos y analizar cómo pueden ser empleados como herramientas estratégicas para la evaluación integral en este tipo de organizaciones. La metodología utilizada para conocer estos distintivos y presentarlos como estándares constó de dos etapas.

Enfoque documental-analítico

En una primera etapa, para cumplir con el objetivo del estudio, se identificaron algunas de las principales certificaciones y distintivos en sostenibilidad aplicables a las MiPyMEs. Para ello, se realizó una revisión de literatura científica en bases de datos académicas como *Dialnet*, *Elsevier*, *Emerald*, *Google Scholar*, *Taylor & Francis* y *Springer*, utilizando cadenas de búsqueda combinadas en español e inglés con términos como: “certificaciones de sostenibilidad”, “responsabilidad social empresarial”, “*sustainability certifications SMEs*”, “ESR distintivo”, “*ISO 14001*”, “*B Corp*”, “*ODS*”, entre otros.

Se priorizaron publicaciones de los últimos cinco años (2020–2025), aunque se incluyeron documentos anteriores cuando se trataba de normas, documentos oficiales y convocatorias. Los criterios de inclusión consideraron estudios académicos y documentos técnicos que abordan: características de los distintivos y certificaciones, beneficios y retos de su implementación, y su relación con los ODS. En total, se identificaron 55 documentos, de los cuales, tras aplicar filtros de pertinencia, duplicidad y actualidad, se seleccionaron 36 fuentes para el análisis.

En una segunda etapa se investigaron convocatorias oficiales de algunos de los principales distintivos nacionales (Distintivo Empresa Socialmente Responsable, Empresas Excepcionales, Mejores Empresas Mexicanas, Premio Ética y Valores en la Industria) y certificaciones internacionales (ISO 14001:2015 y B Corp), registrando aspectos como costos de participación, requisitos y métodos de evaluación. Asimismo, se revisaron documentos oficiales y sitios web especializados. El análisis se centró en identificar sus características, beneficios y retos, considerando también su alineación con los ODS.

La sostenibilidad corporativa, que se entiende como la gestión equilibrada de estas tres dimensiones, se ha convertido en un factor clave para la competitividad y la resiliencia empresarial a largo plazo (Florez-Jimenez *et al.*, 2025). No obstante, la implementación práctica de este enfoque representa un desafío para muchas MiPyMEs debido a limitaciones de recursos, conocimiento y acceso a herramientas adecuadas para medir y demostrar su desempeño sostenible.

En México el compromiso con los ODS supone un reto especialmente relevante para las micro, pequeñas y medianas empresas, dada su importancia en la economía nacional y su potencial para incidir en el desarrollo sostenible.

Las MiPyMEs son unidades productivas que, mediante la combinación de capital y trabajo, generan bienes o servicios para satisfacer la demanda del mercado y obtener rentabilidad. A continuación, en la Tabla 1, se muestra su clasificación según el tamaño.

Tabla 1. Estratificación de las micro, pequeñas y medianas empresas

Tamaño	Sector	Rango de número de trabajadores
Micro	Todas	Hasta 10
Pequeña	Comercio	Desde 11 hasta 30
	Industria y Servicios	Desde 11 hasta 50
Mediana	Comercio	Desde 31 hasta 100
	Servicios	Desde 51 hasta 100
	Industria	Desde 51 hasta 250

Nota. Adaptado del *Acuerdo por el que se establece la estratificación de micro, pequeñas y medianas empresas*, por la Secretaría de Economía, 2009.

Si bien la sostenibilidad ofrece múltiples beneficios a las MiPyMEs, su implementación enfrenta diversos desafíos. La incorporación de nuevas tecnologías, la modernización de infraestructura y la capacitación del personal pueden implicar costos elevados que resultan inaccesibles para muchas organizaciones, especialmente las de menor tamaño. Según Barragán Hernández y Aguilar Fernández (2024), los altos costos de adopción de estrategias sostenibles son una de las principales razones por las que numerosas pequeñas y medianas empresas posponen su implementación, aun cuando a largo plazo pueden generar ahorros y beneficios económicos.

Otro reto significativo es la resistencia interna dentro de las organizaciones, particularmente en aquellas con estructuras más tradicionales, donde prevalece la falta de cultura de innovación y el temor a los riesgos asociados a nuevas prácticas. Como señala Maldonado-Guzmán (2024), la incertidumbre sobre el retorno de inversión y la resistencia al cambio dificultan la transformación empresarial. Además, la limitada comprensión de los beneficios de la sostenibilidad impide que los líderes empresariales perciban su valor estratégico.

En este sentido, Castillo-Esparza *et al.* (2024) destacan que la ausencia de normativas claras y programas de apoyo restringe la capacidad de las pequeñas y medianas empresas para adoptar estrategias sostenibles. La falta de incentivos fiscales, financiamiento preferencial y asistencia técnica dificulta que estas empresas prioricen la sostenibilidad. Asimismo, en ciertos sectores, las regulaciones existentes resultan insuficientes o excesivamente burocráticas, lo que desalienta la implementación de cambios significativos en sus operaciones.

Más allá de estos desafíos, las MiPyMEs también enfrentan limitaciones en su gestión administrativa lo que afecta su capacidad de crecimiento y competitividad (Muñoz del Real, 2025). A pesar de su importancia en la economía, gran parte de la literatura sobre sostenibilidad se ha enfocado en grandes empresas, dejando un vacío en la comprensión de cómo estas organizaciones pueden adoptar modelos sostenibles adaptados a sus características. Considerando su alto impacto, integrar estrategias sostenibles en estas empresas no solo generaría beneficios económicos, sociales y ambientales, sino que también las alinearía con un marco regulatorio en evolución.

Por ello, es importante contar con estándares que permitan analizar el impacto multidimensional de la sostenibilidad en las micro, pequeña y medianas empresas. En este marco, las certificaciones y distintivos se posicionan como herramientas estratégicas clave para evaluar y fortalecer la sostenibilidad en estas organizaciones.

Para alcanzar el objetivo de esta investigación, el estudio se estructura en dos etapas metodológicas que facilitan un análisis de las certificaciones y distintivos aplicables a las MiPyMEs mexicanas. La primera etapa consistió en una revisión documental, mediante la consulta de literatura académica y fuentes oficiales, para identificar algunos de los principales reconocimientos existentes. En la segunda etapa, se llevó a cabo un análisis detallado de las convocatorias oficiales de dichas certificaciones y distintivos, registrando aspectos esenciales como costos, requisitos y métodos de evaluación, así como su vinculación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. A continuación, se presentan las etapas anteriormente mencionadas.

Etapas 1: Identificación de algunas de las principales certificaciones y distintivos en sostenibilidad

En la primera etapa del estudio se identificaron algunas de las principales certificaciones y distintivos de sostenibilidad aplicables a las MiPyMEs mexicanas. Entre ellos se incluyen 5 distintivos y 2 certificaciones, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Certificaciones y distintivos de sostenibilidad identificados

Distintivos	Certificaciones
Premio a la Equidad de Género Empresas Excepcionales	
Mejores Empresas Mexicanas	ISO 14001:2015
Premio Ética y Valores en la Industria	B Corp
Distintivo ESR	

Los reconocimientos antes citados fueron seleccionados a partir de una revisión bibliográfica en bases de datos académicas y documentos oficiales, priorizando fuentes relevantes y actuales relacionadas con los ODS.

Etapas 2: Identificación de las características, beneficios y retos de algunas de las principales certificaciones y distintivos

De acuerdo con Nygaard (2023), las certificaciones en sostenibilidad son reconocimientos formales fundamentados en estándares y normas previamente definidos por organismos reguladores independientes y externos a la empresa. Las mismas son otorgadas a organizaciones que, tras un proceso de evaluación, demuestran el cumplimiento satisfactorio de criterios establecidos en materia de sostenibilidad.

La Responsabilidad Social Empresarial (RSE) está cobrando más importancia no solo para las propias empresas, sino también para la estructura financiera y social en general de los países. Actualmente, más que ser una ventaja competitiva o valor agregado, se perfila como un estándar esperado y un requisito clave para que las organizaciones puedan ser consideradas sostenibles en el mediano y largo plazo (Lazaro Soto *et al.*, 2025 y Quispe *et al.*, 2025).

De acuerdo con Hernández Barrera y Echeverría Ríos (2024), aunque la RSE no es obligatoria, se vincula con los compromisos de la Agenda 2030, lo que evidencia el interés del sector empresarial por generar impactos positivos en lo social, económico y ambiental. En este sentido, el distintivo ESR funciona como un mecanismo para fortalecer la competitividad, promover una cultura ética y de respeto a los derechos humanos, impulsar condiciones laborales justas y fomentar prácticas empresariales orientadas a la sostenibilidad y al bienestar social.

Siguiendo esta perspectiva, Elembilassery (2023) señala que entre 2010 y 2020, el concepto de RSE ha abarcado no sólo la implementación de acciones responsables, sino también la evolución de su obligatoriedad, influida por factores económicos y político-legales. Además, García-Rivas *et al.* (2023) destacan que el informe de RSE ha adquirido una importancia estratégica en las empresas, impulsado por normativas internacionales como el Pacto Mundial y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

México cuenta con el Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI), que se ha establecido como una institución líder para promover la responsabilidad social empresarial. Creado en 1988, el CEMEFI desde el 2001 otorga el premio honorífico ESR (Empresa Socialmente Responsable) a organizaciones que cumplen determinados criterios en áreas como la ética empresarial, la calidad de vida laboral, la participación comunitaria y la protección del medio ambiente (Centro Mexicano para la Filantropía [CEMEFI], s.f.a).

Este proceso permite evaluar de manera estructurada el grado de avance en la implementación de buenas prácticas de responsabilidad social en las empresas, utilizando indicadores que comprende el ámbito ambiental, social y de gobernanza (Hernández de la Cruz y Juárez Solís, 2023). Asimismo, incorpora de forma indirecta la dimensión económica, entendida desde la ética empresarial y la sostenibilidad financiera responsable.

Por ejemplo, en el ámbito económico, se pueden considerar indicadores como el porcentaje de ahorro en costos operativos o la inversión en innovación sostenible. En la dimensión social destacan la diversidad e igualdad de oportunidades, la rotación de personal y las horas de formación impartidas al personal. Mientras que, en el ámbito ambiental, indicadores como el consumo energético, la gestión de residuos o la existencia de un plan de mitigación ambiental permiten monitorear el compromiso real de las organizaciones con la sostenibilidad. Finalmente, la dimensión de gobernanza, que forma parte integral del distintivo, se refleja en la adopción de prácticas éticas, transparencia en la toma de decisiones y políticas internas que promueven la responsabilidad corporativa. Estos indicadores permiten no solo evaluar el desempeño empresarial, sino también identificar oportunidades de mejora para la obtención del distintivo ESR.

Actualmente, el CEMEFI sigue siendo el organismo formal más relevante en este tema, atendiendo tanto a grandes empresas como a MiPyMEs, y les ha permitido a estas organizaciones mejorar sus operaciones y distinguirse, lo que les facilita ganar confianza y mejorar la reputación de las certificadas.

Hernandez de la Cruz *et al.* (2024) analizan la aplicación de la Responsabilidad Social Empresarial en las PyMEs mexicanas y su relación con los ODS. A través de un enfoque cualitativo basado en análisis documental y observación, se identificó que, aunque las PyMEs reconocen la importancia de la RSE, enfrentan dificultades para implementarla por falta de recursos y desconocimiento. Solo una de cada diez empresas analizadas aplica estrategias alineadas con los ODS, y aunque algunas obtienen el distintivo ESR, pocas lo mantienen de manera constante. Por otro lado, Flores Amador (2025) refiere que dicho distintivo no influye significativamente en el valor de las empresas que cotizan en la Bolsa Mexicana de Valores, ya que no se encontró una diferencia estadística en el precio de sus acciones.

Basado en la convocatoria para obtener el Distintivo Empresa Socialmente Responsable en 2025 para MiPyMEs, se comenta que, obtener el distintivo puede convertirse en un verdadero desafío financiero. Asimismo, se establece una cuota de participación obligatoria, cuyo costo varía según el tamaño de la empresa y la modalidad en la que se inscriba. Asimismo, existen gastos adicionales, como la retroalimentación y las estatuillas conmemorativas. En un entorno donde

cada peso cuenta, algunas empresas simplemente no pueden justificar este gasto y se ven obligadas a dejar de lado la oportunidad de obtener el reconocimiento. A continuación, se presentan los principales elementos considerados en dicha convocatoria según el tipo de empresa.

Tabla 3. Costos de las cuotas de participación y servicios adicionales

Concepto	Costo (MXN)	Descripción
Cuota de participación	Variable (Desde \$21,000.00 hasta \$89,000.00)	Obligatoria según tamaño y modalidad de la empresa
Retroalimentación	\$7,000.00	Sesión sobre resultados y calidad de evidencias
Estatuilla conmemorativa	\$9,000.00 c/u	Réplicas adicionales de la statuilla

Nota. Adaptado de la *Convocatoria para obtener el Distintivo ESR® en 2025 para MiPyMEs*, por el CEMEFI, 2025.

Además del distintivo antes mencionado, otorgado por el CEMEFI, existen otros reconocimientos en México que permiten a las empresas, particularmente a las MiPyMEs, fortalecer su imagen, mejorar sus procesos internos y generar un impacto positivo en la sociedad y el medio ambiente.

Premio a la Equidad de Género

Este premio es convocado por el Instituto Mexicano de Ejecutivos de Finanzas (IMEF) y Mujeres en Finanzas (MEF), y está dirigido a organizaciones comprometidas con la equidad de género. Su metodología se basa en un cuestionario técnico evaluado por expertos, cuyas preguntas se agrupan en cuatro pilares fundamentales:

1. Efectividad de políticas y lineamientos: Evalúa la existencia, difusión y aplicación de normas que favorecen la incorporación, permanencia y crecimiento profesional de las mujeres en la organización.
2. Representatividad: Mide la creación de entornos laborales inclusivos, la evaluación del impacto de las políticas implementadas y la colaboración con otras empresas que también promueven la equidad de género.
3. Brecha salarial: Analiza las iniciativas para eliminar desigualdades económicas entre hombres y mujeres, fomentar la flexibilidad laboral y facilitar el acceso de las mujeres a cargos de liderazgo.
4. Equidad de género: Considera acciones orientadas a atender la diversidad de necesidades del personal, así como medidas concretas para proteger los derechos de las mujeres, la infancia y las familias, tanto dentro como fuera del ámbito laboral.

El premio promueve prácticas inclusivas y de protección a grupos vulnerables, impulsando una cultura organizacional justa y equitativa (Instituto Mexicano de Ejecutivos de Finanzas [IMEF] y Mujeres en Finanzas [MEF], s.f.). Sin embargo, a pesar de que la convocatoria busca reconocer a empresas de diversos tamaños, en sus ediciones de 2022, 2023 y 2024, ha galardonado a grandes corporaciones. La categoría para empresas con menos de 500 colaboradores, que podría ser relevante para las MiPyMEs, exige ingresos anuales superiores a los 250 millones de pesos. Este requisito financiero eleva la barrera de entrada, lo que explica por qué los ganadores han sido consistentemente grandes empresas, dejando fuera a la mayoría de las MiPyMEs.

Empresas Excepcionales

El reconocimiento organizado por el Consejo Coordinador Empresarial, el Consejo de la Comunicación y el Instituto para el Fomento a la Calidad, distingue a las organizaciones que aplican buenas prácticas en distintos ámbitos. Entre las categorías evaluadas se encuentran el bienestar laboral, la innovación, la diversidad, la transformación digital y, de

manera especial, la contribución a los ODS. Obtener este distintivo ofrece beneficios como una evaluación externa confiable, mayor visibilidad, reconocimiento a los colaboradores y el uso del sello “Empresas Excepcionales”. El proceso incluye la inscripción, la entrega de documentación, una entrevista en línea y la revisión por parte del consejo de premiación. La participación tiene un costo que depende del tamaño de la empresa: \$8,500 para pequeñas, \$30,000 para medianas y \$41,000 para grandes (Instituto para el Fomento a la Calidad *et al.*, 2025).

Mejores Empresas Mexicanas

El distintivo impulsado por Citibanamex, Deloitte y el Tecnológico de Monterrey, tiene como propósito reconocer y fortalecer a compañías medianas del país que muestran un alto desempeño en su gestión empresarial. Para participar, las organizaciones deben ser privadas, de capital mexicano, reportar ventas anuales entre 100 y 7,000 millones de pesos, tener al menos cinco años de operación continua y al menos dos años consecutivos de utilidades. Además, se requiere la presentación de estados financieros auditados y pruebas de sus estrategias y resultados. El proceso de evaluación consta de tres etapas: registro y envío de documentos, elaboración de un caso de negocio revisado por un comité de especialistas y, finalmente, la selección de las empresas que obtendrán el reconocimiento. Entre los beneficios asociados a este distintivo se encuentran el fortalecimiento de la reputación corporativa, mayor visibilidad, atracción de talento y la posibilidad de integrarse a una red de empresas que comparten mejores prácticas (Citibanamex *et al.*, s.f.).

Premio Ética y valores en la Industria

Este premio, organizado por la Confederación de Cámaras Industriales (CONCAMIN), reconoce a cámaras, asociaciones, pequeñas, medianas y grandes empresas mexicanas que han demostrado avances y madurez en responsabilidad social empresarial, desarrollo sostenible y la adopción de criterios ASG (Ambiental, Social y de Gobernanza). Este reconocimiento evalúa la gestión integral de la RSE y el desarrollo sostenible a través de acciones enfocadas en la gobernanza, el respeto a los derechos humanos, las relaciones laborales, la preservación del medio ambiente, la prevención de negocios ilícitos, el civismo organizacional y la oferta de productos y servicios responsables. Para participar es indispensable pertenecer a CONCAMIN y seguir un proceso que incluye la inscripción mediante un formulario electrónico, la resolución de un cuestionario de autoevaluación y la presentación de evidencias que respalden las respuestas. Finalmente, un comité de evaluación revisa la información y selecciona a los ganadores, quienes pueden recibir menciones honoríficas, reconocimientos por trayectoria o por prácticas destacadas. A diferencia de otros distintivos, este premio no implica un costo de participación; sin embargo, presenta la restricción de estar limitado exclusivamente a las instituciones afiliadas a la organización rectora (Confederación de Cámaras Industriales de los Estados Unidos Mexicanos [CONCAMIN], 2023).

Además de los distintivos nacionales, la Norma ISO 14001:2015 representa una certificación internacional que establece un sistema de gestión ambiental para ayudar a las organizaciones a reducir sus impactos ambientales, cumplir con la legislación vigente y mejorar su desempeño sostenible. El proceso de certificación implica diseñar, implementar y mantener políticas, objetivos y procedimientos ambientales, además de someterse a auditorías externas (*International Organization for Standardization* [ISO], s.f.). La ISO 14001:2015 contribuye directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente al promover la producción responsable, la acción climática y la protección de los ecosistemas (Muktiono y Soediantono, 2022).

Para las empresas, esta certificación trae beneficios como mayor eficiencia, acceso a mercados, mejora en la imagen corporativa y cumplimiento normativo, aunque también representa retos financieros y de recursos para adoptarla (Muktiono y Soediantono, 2022; Gélvez-Rengifo y Serna-Gómez, 2024). Ejemplos en México incluyen a ACO México, que mejoró su eficiencia y relaciones comerciales tras obtener la certificación, y Aceros Luchriher S.A. de C.V., que redujo impactos ambientales y elevó la calidad de sus procesos. Además, empresas como *APS Group* han logrado la reducción en el consumo de energía y la optimización de la gestión de residuos (Ramos-Soto *et al.*, 2020).

B Corp, es otra certificación internacional impulsada por la organización sin fines de lucro B Lab desde 2006. La misma es un modelo internacional que evalúa y reconoce a aquellas empresas que integran criterios de sostenibilidad en su gestión, promoviendo un enfoque de “triple impacto” que trasciende la maximización del beneficio económico para incorporar también el bienestar social y la sostenibilidad ecológica (B Lab, s.f.).

Esta certificación se distingue de otras por su evaluación holística, que abarca cinco ámbitos: gobernanza, trabajadores, comunidad, medio ambiente y clientes, evaluando tanto la estructura como las operaciones cotidianas de la empresa para asegurar el compromiso con altos estándares de desempeño, transparencia y responsabilidad legal (Montiel Vargas, 2022). El proceso inicia con la realización de la *B Impact Assessment (BIA)*, una herramienta digital que, a través de evidencia documental y verificación exhaustiva —incluyendo entrevistas y, en algunos casos, visitas presenciales— determina si la empresa alcanza un puntaje mínimo de 80 sobre 200. Además, la empresa debe modificar formalmente sus estatutos sociales para incorporar el compromiso explícito de generar impacto positivo y considerar en la toma de decisiones a todos los grupos de interés (*stakeholders*), firmar un acuerdo con *B Lab* y pagar una tarifa proporcional a sus ingresos anuales, siendo la certificación válida por tres años, tras los cuales debe renovarse (Diez-Busto *et al.*, 2022; Pollmeier *et al.*, 2025).

La certificación *B Corp* brinda beneficios importantes como fortalecer su cultura organizacional, aumentar el compromiso con la sostenibilidad, facilitar el acceso a redes de negocio y atraer talento e inversionistas enfocados en criterios económicos, sociales y de gobernanza (ESG). Además, funciona como una herramienta de mejora continua, no solo un distintivo comercial (Jiménez Barandalla *et al.*, 2021).

La certificación *B Corp* en México ha crecido de manera paulatina, debido principalmente a la ausencia de un marco legal que reconozca formalmente el propósito social de las empresas y a la limitada difusión del concepto, lo que disminuye su influencia comercial en el mercado local. Sin embargo, compañías como Iluméxico, Aires de Campo, Natura, Pízza y Sistema.bio, entre otras, han aprovechado esta certificación para mejorar sus procesos internos, aumentar la transparencia y facilitar el acceso a financiamiento sostenible, demostrando así el potencial de transformación que tiene esta herramienta en el país (Movimiento B México, s.f.).

En síntesis, las MiPyMEs mexicanas juegan un papel clave en la economía, pero enfrentan obstáculos para adoptar modelos sostenibles. Las certificaciones y distintivos de sostenibilidad pueden ser herramientas útiles para superar estos retos y aumentar su competitividad, aunque también presentan desafíos. A continuación, se presentan los principales hallazgos obtenidos.

Resultados y Discusión

Los resultados del presente estudio muestran que, aunque los reconocimientos representan una vía para formalizar el compromiso con la sostenibilidad, su adopción entre las MiPyMEs sigue limitada. Los principales obstáculos son los costos de participación, la complejidad de los requisitos y la falta de acompañamiento técnico. En particular, el costo financiero se confirma como una barrera importante, pues las cuotas y gastos adicionales suelen ser elevados para organizaciones con recursos limitados. Esta situación coincide con lo señalado por Barragán Hernández y Aguilar Fernández (2024), quienes destacan los altos costos como la principal causa por la que muchas MiPyMEs posponen o desisten de certificarse. Además, la fragmentación de los mecanismos de certificación, algunas enfatizan el aspecto social y otras el ambiental, limita la existencia de un marco unificado y accesible (Van der Waal y Thijssens, 2020).

México cuenta con una diversidad de distintivos y certificaciones que ofrecen a las MiPyMEs fortalecer sus prácticas responsables. Entre los reconocimientos nacionales más representativos destacan: Distintivo Empresa Socialmente Responsable, Premio Ética y Valores en la Industria, Empresas Excepcionales y Mejores Empresas Mexicanas, mientras que a nivel internacional resaltan la norma ISO 14001:2015 y la certificación *B Corp*.

En la tabla 4, se presenta un análisis comparativo con los reconocimientos identificados en la literatura, destacando sus criterios de evaluación, aplicabilidad y alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. La adopción de estos instrumentos no solo contribuye a mejorar la sostenibilidad empresarial, sino que también potencia la competitividad y capacidad de adaptación frente a las crecientes exigencias normativas y del mercado.

Las características generales de los distintivos y certificaciones expuestas en la tabla 4 proporcionan un marco de referencia para comprender su enfoque, dimensión y relevancia estratégica para las MiPyMEs mexicanas. Sin embargo, para profundizar en su aplicabilidad práctica, es importante considerar aspectos como los costos asociados, la vigencia de cada uno y, sobre todo, ejemplos concretos de MiPyMEs que han adoptado estas certificaciones o distintivos. A

continuación, se presenta la tabla 5 que integra esta información, fortaleciendo así el análisis aplicado y ofreciendo una visión más tangible de la adopción de estas herramientas en el contexto mexicano. Esto fue recopilado de fuentes como: Instituto Mexicano de Ejecutivos de Finanzas [IMEF] y Mujeres en Finanzas [MEF], (s.f.); Instituto para el Fomento a la Calidad *et al.* (2024); Instituto para el Fomento a la Calidad *et al.* (2025); Citibanamex *et al.* (s.f.), Confederación de Cámaras Industriales de los Estados Unidos Mexicanos (CONCAMIN), (s.f); Confederación de Cámaras Industriales de los Estados Unidos Mexicanos [CONCAMIN], 2023; Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI), (2025); Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI), (s.f.b); Diez-Busto *et al.*, 2022; Vera-Solano (2024); Pollmeier *et al.*, 2025.

Tabla 4. Distintivos alternativos que promueven la RSE en México y la sostenibilidad en las MiPyMEs mexicanas

Nombre del distintivo	Tipo	Dimensión	Método de evaluación	Relevancia para MiPyMEs	Alineación con los ODS
Premio a la Equidad de Género	Premio	Social	Cuestionario y evaluación por comité técnico	Fomenta políticas de igualdad y diversidad laboral	5, 8, 10
Empresas Excepcionales	Distintivo	Social, económica	Evaluación documental y entrevistas	Promueve innovación, bienestar laboral y sostenibilidad	3, 8, 9, 12
Mejores Empresas Mexicanas	Distintivo	Económica	Evaluación de desempeño en gestión de negocios	Impulsa profesionalización y buenas prácticas operativas	8, 9, 12
Premio Ética y Valores en la Industria	Premio	Ambiental, Social y Gobernanza	Cuestionario y evaluación por comité	Fortalece ética empresarial, prácticas sostenibles y cumplimiento voluntario de normas	8, 12, 16
Distintivo ESR	Distintivo	Ambiental, Social y Gobernanza (incluye de forma indirecta lo económico)	Cuestionario, evidencias y verificación documental	Favorece cultura ética, derechos humanos y sostenibilidad; adaptado a MiPyMEs	3, 5, 8, 12, 16
ISO 14001:2015	Certificación	Ambiental	Auditoría externa periódicamente de sistemas de gestión ambiental	Mejora eficiencia y acceso a mercados; requiere recursos significativos	12, 13, 15
B Corp	Certificación	Gobernanza, trabajadores, comunidad, medio ambiente, clientes	Evaluación holística (<i>B Impact Assessment</i>) más verificación externa	Fomenta triple impacto, transparencia y acceso a redes de sostenibilidad	8, 9, 12, 16

Nota. Información obtenida de las convocatorias y sitios oficiales mencionados previamente

Si bien todas las certificaciones y distintivos comparten el objetivo de impulsar la sostenibilidad empresarial, presentan diferencias en cuanto a enfoque y accesibilidad. Se observa que los premios y distintivos nacionales se centran en dimensiones sociales, ambientales y de gestión interna, siendo más flexibles en su evaluación y, por tanto, relativamente más asequibles para MiPyMEs en comparación con las certificaciones internacionales. A diferencia, instrumentos como ISO 14001:2015 y *B Corp* ofrecen una evaluación más rigurosa y holística, aunque su adopción exige una mayor capacidad organizacional y financiera. Estas certificaciones, que suelen tener una vigencia de tres años, implican costos variados que incluyen auditorías externas, capacitación, consultorías y mejoras continuas, factores que las convierten en una inversión significativa para las MiPyMEs.

Tabla 5. Costos, vigencia y ejemplos de obtención en MiPyMEs de reconocimientos nacionales de sostenibilidad.

Nombre del distintivo	Costo	Vigencia	Ejemplos de MiPyMEs que han obtenido el reconocimiento
Premio a la Equidad de Género	Sin costo	Anual	No existe empresa ganadora
Empresas Excepcionales	<i>Pequeña:</i> \$8,500.00 <i>Mediana:</i> \$30,000.00	Anual	<i>Pequeña:</i> GRUPO MC TREE, en la categoría “Innovar el modelo de negocio” Entropy, en la categoría “Fomentar el bienestar de los colaboradores” <i>Mediana:</i> Entidad Mexicana de Acreditación, A.C. Categoría “Favorecer la diversidad, equidad e inclusión” Instituto Mexicano de Contadores Públicos, en la categoría “Contribuir a los ODS”
Mejores Empresas Mexicanas	Sin costo	Anual	<i>Grupo abco, detecno, Qualysis, Servitron</i>
Premio Ética y Valores en la Industria	Sin costo	Anual	FAICIC Centro de Investigación Clínica, J. Rettenmmaier & Söhne (Derivados Macroquímicos) y Hotel Misión La Muralla
Distintivo ESR	Desde \$21,000.00 hasta \$89,000.00	Anual	<i>Micro:</i> CARDIOPROTECCION, con razón social: CARDIO SOLUTIONS (Comercio al por Mayor) <i>Pequeña:</i> GREEN CARSON, con razón social: "GREEN CARSON" (Servicios de apoyo a los negocios y manejo de residuos, y servicios de remediación) <i>Mediana:</i> SAINT-GOBAIN AMERICA, con razón social SAINT-GOBAIN AMERICA (Industria Manufacturera)
ISO 14001:2015	Varía según tamaño de la empresa y la institución acreditadora	3 años	No se especifica
B Corp	Tarifa anual proporcional a ingresos.	3 años	No se especifica

Asimismo, se evidencia que no existe un marco unificado que integre todas las dimensiones de la sostenibilidad, lo cual puede generar que las empresas seleccionen aquellas certificaciones que mejor se ajusten a su sector o a sus recursos. La tabla 6 es una guía práctica que contiene etapas clave que facilitan la identificación de prioridades, la selección adecuada, la planificación, implementación y el seguimiento para simplificar el camino hacia la sostenibilidad.

La guía presentada ofrece un marco operativo útil para que las MiPyMEs estructuren y gestionen de forma sistemática su camino hacia la obtención de una certificación, premio o distintivo. El seguimiento de este proceso permite optimizar recursos, reducir tiempos y maximizar los impactos positivos económicos, sociales y ambientales, fortaleciendo su posición en el mercado y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Como líneas de trabajo futuro, se recomienda avanzar en estudios comparativos por sectores y regiones para evaluar la efectividad y beneficios de las diferentes certificaciones. De igual manera, es importante proponer recomendaciones

concretas para mejorar el acceso de MiPyMEs a estos reconocimientos. Una investigación especialmente relevante consiste en el diseño de un instrumento práctico y accesible que permita a este tipo de empresas medir sus impactos en materia de sostenibilidad, facilitando así su alineación con los ODS y reduciendo las barreras de entrada actuales.

Tabla 6. Guía práctica para la adopción de certificaciones, distintivos o premios en MiPyMEs mexicanas

Paso	Acción clave	Detalles y recomendaciones
1. Diagnóstico de la empresa	Evaluar objetivos estratégicos, capacidades y recursos.	Identificar fortalezas, debilidades y áreas prioritarias en las dimensiones económica, social y ambiental.
2. Evaluación y priorización	Seleccionar certificaciones y distintivos alineados con objetivos.	Considerar dimensión, relevancia para la empresa, método de evaluación, costos, beneficios, tiempos y complejidad.
3. Planificación	Elaborar un plan con tareas, alcances, responsabilidades, recursos y cronograma.	Organizar actividades necesarias incluyendo capacitación, adecuación de procesos y generación de documentación.
4. Implementación	Ejecutar el plan y coordinar auditorías externas.	Realizar adecuaciones, documentar evidencias y gestionar evaluaciones formales para validar cumplimiento.
5. Seguimiento	Monitorear resultados e impactos para mejora continua.	Medir el impacto de las certificaciones, premios o distintivos en las partes interesadas y ajustar procesos.

Conclusiones

Este estudio confirma que, si bien las certificaciones y distintivos de sostenibilidad son herramientas valiosas para que las MiPyMEs mexicanas evalúen de manera integral su impacto económico, social y ambiental, la falta de un marco común que abarque todas estas dimensiones puede conducir a una gestión incompleta. En la práctica, esto significa que las empresas tienden a optar por aquellos reconocimientos que mejor se adaptan a sus recursos y sector, sin asegurar necesariamente un enfoque holístico y equilibrado de la sostenibilidad.

Estos reconocimientos identificados en la investigación, al promover la transparencia y facilitar el acceso a financiamiento sostenible, aportan beneficios claros para el desarrollo empresarial. Sin embargo, su adopción enfrenta desafíos significativos relacionados con costos, falta de información y ausencia de políticas públicas específicas.

En particular, los distintivos nacionales como el Empresa Socialmente Responsable y el Premio Ética y Valores en la Industria aportan principalmente legitimidad social, reputación y confianza. Por otro lado, reconocimientos como Empresas Excepcionales y Mejores Empresas Mexicanas se centran en el fortalecimiento interno y la innovación. Las certificaciones internacionales como *ISO 14001* y *B Corp*, ofrecen ventajas adicionales en acceso a mercados, atracción de talento y participación en redes globales, aunque sus altos costos y requisitos de formalización limitan su adopción entre las MiPyMEs.

Por ello, es imprescindible que tanto el sector público como privado implementen mecanismos de apoyo y campañas de sensibilización que faciliten la incorporación de estas herramientas, especialmente por parte de las empresas de menor tamaño. De esta manera, promover la sostenibilidad no solo contribuye a un desarrollo empresarial responsable, sino que también potencia la competitividad y la generación de valor social y ambiental para el país.

Adicionalmente, se destaca la importancia de que futuras investigaciones se enfoquen en el desarrollo de herramientas y mecanismos prácticos que permitan a las MiPyMEs medir y gestionar de manera efectiva sus impactos económicos, sociales y ambientales, facilitando así una adopción más amplia de prácticas sostenibles y su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Este enfoque complementa los hallazgos presentes y responde a las necesidades identificadas durante la investigación.

Bibliografía

- Al-ahdal, W. M., Muhmad, S. N., Farhan, N. H., Almaqtari, F. A., Mhawish, A., & Hashim, H. A. (2024). Unveiling the impact of firm-characteristics on sustainable development goals disclosure: A cross-country study on non-financial companies in Asia. *Borsa Istanbul Review*, 24(5), 916–933. <https://doi.org/10.1016/j.bir.2024.05.003>
- B Lab. (s.f.). About B Lab. <https://www.bcorporation.net/en-us/movement/about-b-lab/>
- Bali Swain, R., & Yang-Wallentin, F. (2020). Achieving sustainable development goals: Predicaments and strategies. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 27(2), 96–106. <https://doi.org/10.1080/13504509.2019.1692316>
- Barragán-Hernández, A. D., & Aguilar-Fernández, M. (2024). Strategic dimensions of eco-innovation adoption in manufacturing SMEs in the context of Mexico City. *Systems*, 12(7), 246. <https://doi.org/10.3390/systems12070246>
- Castillo-Esparza, M. M. G. C., Maldonado-Guzmán, G., Mejía-Trejo, J., & Martínez-Serna, M. del C. (2024). Economic performance of eco-innovation practices in micro, small and medium-sized manufacturing enterprises. *Scientia et Praxis*, 4(08), 1–27. <https://doi.org/10.55965/setp.4.08.a1>
- Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI). (2025). Convocatoria para obtener el Distintivo ESR® en 2025 para MiPyMEs. <https://www.cemefi.org/wp-content/uploads/2025/01/Distintivo-ESR-MiPyMEs-2025-Convocatoria.pdf>
- Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI). (s.f.a). Distintivo Empresa Socialmente Responsable (ESR). <https://www.cemefi.org/cemefi/>
- Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI). (s.f.b). Publicación Distintivo ESR. Plataforma CEMEFI. <https://esr.cemefi.org/publicacion>
- Citibanamex, Deloitte, & Tecnológico de Monterrey. (s.f.). Mejores Empresas Mexicanas. Conócenos. <https://mejoresempresasmexicanas.com>
- Confederación de Cámaras Industriales de los Estados Unidos Mexicanos (CONCAMIN). (s.f.). Entrega CONCAMIN premio Ética y Valores 2022. https://concamin.org.mx/?page_id=385
- Confederación de Cámaras Industriales de los Estados Unidos Mexicanos (CONCAMIN). (2023). *Convocatoria Premio Ética y Valores en la Industria – Vigésima primera edición*. <https://res.cloudinary.com/concamin/image/upload/v1685046250/qrlvm1qhgan9r1e6qtix.pdf>
- Diez-Busto, E., Sanchez-Ruiz, L., & Fernandez-Laviada, A. (2022). B Corp certification: Why? How? and what for? A questionnaire proposal. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133801. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133801>
- Du, Q., Xue, M., Li, Z., Du, A. M., & Yang, T. (2024). Economic vulnerabilities and sustainability in energy utilities: Managing climate change in the face of geopolitical turmoil. *Research in International Business and Finance*, 71, 102436. <https://doi.org/10.1016/j.ribaf.2024.102436>
- Elembilassery, V. (2023). Evolutionary influences on corporate social responsibility literature: A review and prognosis. *Society and Business Review*, 18(3), 504–522. <https://doi.org/10.1108/SBR-05-2022-0136>
- Flores Amador, A. C. (2025). Corporate social responsibility and value creation in the Mexican Stock Exchange: Impact of the Socially Responsible Company (ESR) distinctive. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(6), 3551–3565. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i6.3260>
- Florez-Jimenez, M. P., Lleo, A., Ruiz-Palomino, P., & Muñoz-Villamizar, A. F. (2025). Sostenibilidad corporativa, resiliencia organizacional y propósito corporativo: Una revisión de las tradiciones académicas que los conectan. *Review of Managerial Science*, 19(1), 67–104. <https://doi.org/10.1007/s11846-024-00735-3>
- García-Rivas, M. I., Gálvez-Sánchez, F. J., Noguera-Vivo, J. M., & Meseguer-Sánchez, V. (2023). Corporate social responsibility reports: A review of the evolution, approaches and prospects. *Heliyon*, 9(7), e18348. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18348>
- Gélvez Rengifo, M. E., & Serna-Gómez, H. M. (2024). ISO 14001: Retos, impactos, desempeño y oportunidades para las organizaciones. *Lúmina*, 25(1), 1. <https://doi.org/10.30554/lumina.v25.n1.4821.2024>
- Hernández Barrera, M. J., & Echeverría Ríos, O. M. (2024). El Distintivo ESR otorgado por CEMEFI a través del modelo de responsabilidad social empresarial. *Milenaria, Ciencia y Arte*, (24), 66–68. <https://doi.org/10.35830/mcya.vi24.529>
- Hernández de la Cruz, J. E., & Juárez Solís, S. (2023). Distintivo ESR: Estrategia de responsabilidad social empresarial en la inclusión de pequeños productores en México. *Realidad Empresarial*, (15), 50–55. <https://doi.org/10.51378/reuca.v1i15.7724>
- Hernández de la Cruz, J. E., Juárez Solís, S., & Pérez Sandoval, A. G. (2024). Responsabilidad social empresarial: Estrategia hacia los objetivos de desarrollo sostenible en pequeñas y medianas empresas mexicanas. *Transdigital*, 5(9), e308. <https://doi.org/10.56162/transdigital308>
- Instituto Mexicano de Ejecutivos de Finanzas (IMEF) & Mujeres en Finanzas (MEF). (s.f.). Premio a la Equidad de Género IMEF-MEF. <https://premioequidaddegenero.org.mx/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Estadísticas a propósito del día de las micro, pequeñas y medianas empresas. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/MYPIMES20.pdf>
- Instituto para el Fomento a la Calidad (IFC), Consejo Coordinador Empresarial (CCE), & Consejo de la Comunicación (CC). (2024). Ganadoras REE 2024. <https://ifc.org.mx/ree-ganadoras/ganadoras2024.php>
- Instituto para el Fomento a la Calidad (IFC), Consejo Coordinador Empresarial (CCE), & Consejo de la Comunicación (CC). (2025). *Guía de participación 2025–2026. Empresas Excepcionales*. <https://ifc.org.mx/wp-content/uploads/2025/01/GUIA-EE-2025-2026-a.pdf>
- International Organization for Standardization (ISO). (s.f.). ISO 14001:2015 – Sistemas de gestión ambiental. <https://www.iso.org/es/norma/14001>
- Jiménez Barandalla, I. C., Lacalle Calderón, M., & Pimenta, A. (2021). B Corp como solución innovadora para alcanzar los ODS de manera integrada: El caso Farmidable. *Revista Iberoamericana de Economía Solidaria e Innovación Socioecológica*, 4(1). <https://doi.org/10.33776/riesise.v4i1.5163>
- Lazaro Soto, B. E., Tejada Arana, A. A., & Contreras Rivera, R. J. (2025). Responsabilidad social empresarial y conservación del medio ambiente: Estrategias y desafíos para un desarrollo sostenible. *Revista InveCom*, 5(3), e050369. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14511202>
- Maldonado-Guzmán, G. (2024). Green innovation mediates between financial innovation and business sustainability? Proof in the Mexican manufacturing industry. *Green Finance*, 6(3), 563–584. <https://doi.org/10.3934/gf.2024021>
- Montiel Vargas, A. (2022). Las Empresas B (B Corps) y la regulación de las sociedades con propósito en derecho comparado. *REVESCO. Revista de Estudios Cooperativos*, 141, e82253. <https://doi.org/10.5209/reve.82253>
- Movimiento B México. (s.f.). Empresas B en México. <https://www.movimientobmexico.org/empresas-b-mexico>

- Muktiono, E., & Soediantono, D. (2022). Literature review of ISO 14001 environmental management system benefits and proposed applications in the defense industries. *Journal of Industrial Engineering & Management Research*, 3(2), 1–12.
- Muñoz del Real, G. (2025). Competitividad en MiPyMEs rurales. *Investigación Administrativa*, 54(135). <https://doi.org/10.35426/iav54n135.04>
- Nygaard, A. (2023). Is sustainable certification's ability to combat greenwashing trustworthy? *Frontiers in Sustainability*, 4, 1188069. <https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1188069>
- Pollmeier, T., Fisch, C., & Hirschmann, M. (2025). From profit to purpose: A systematic literature review and future research directions on B Corp certification. *Management Review Quarterly*, 1–44. <https://doi.org/10.1007/s11301-025-00499-4>
- Quispe, R., Aguilar, H., Gracia, M., Muñoz, L., Ñiquen, C., & Vargas, D. (2025). Responsabilidad social empresarial como estrategia sostenible y la toma de decisiones empresariales. *SCIÉND0*, 27(4), 565–573. <https://doi.org/10.17268/sciendo.2024.092>
- Ramos-Soto, A., Londoño, D., Sepúlveda Aguirre, J., & Martínez-Jiménez, R. (2020). Gestión integral e integrada: Experiencia de las empresas en México. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 26(3), 31–44. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7565465>
- Secretaría de Economía. (2009). Acuerdo por el que se establece la estratificación de micro, pequeñas y medianas empresas. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5096849&fecha=30/06/2009&print=true
- Van der Waal, J. W., & Thijssens, T. (2020). Corporate involvement in sustainable development goals: Exploring the territory. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119625. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119625>
- Vera-Solano, J. (2024). Los altos costos como variable limitante en la gestión ambiental de las PyME. *Informador Técnico*, 88(1), 103–118. <https://doi.org/10.23850/22565035.6026>
- Zavaleta González, J., & Rodríguez Medina, O. (2024). Productividad laboral en las MiPyMEs de México: lecciones pospandemia. *Investigación Económica*, 83(329), 139–163. <https://doi.org/10.22201/fe.01851667p.2024.329.88672>

MESBI: Un Modelo de Estrategias Sostenibles para la Agricultura

Rubén Alexis Flores-Nava, Alina Juantorena-Ugás y Jesús del Carmen Peralta-Abarca *

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México.

* Autor de correspondencia: carmen.peralta@uaem.mx.

Desarrollo Sustentable (Agricultura Sustentable)

Recibido: 23 de abril de 2025

Aceptado: 7 de junio de 2025

Publicado: 31 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.450>

Resumen: El propósito de esta investigación es desarrollar un Modelo de Estrategias Sostenibles Basado en Indicadores (MESBI), orientado a optimizar la producción de aguacates de forma sostenible en la región norte del estado de Morelos, México, durante el año 2024. El modelo se fundamenta en indicadores ambientales, que permiten evaluar el impacto de las prácticas agrícolas y diseñar estrategias orientadas a la conservación ambiental y la gestión eficiente de los recursos. MESBI siguió seis etapas: diagnóstico, objetivos SMART, selección de indicadores, implementación, evaluación continua y comunicación. Se realizó un análisis de estos indicadores y una intervención social mediante encuestas dirigidas a 15 productores con más de 2 ha en Huitzilac (75 % de la localidad); con el fin de identificar áreas críticas de mejora y fomentar prácticas sostenibles. Asimismo, se elaboró un mapa estratégico y un plan de acción con metas SMART para conservar el suelo, preservar la biodiversidad y optimizar el uso de agroquímicos. Los resultados resaltan el valor de los indicadores ambientales para la toma de decisiones informadas. Aunque la mayoría de los productores emplea agroquímicos, existe disposición para adoptar prácticas más responsables. MESBI proporciona una metodología estructurada que permite evaluar y mitigar el impacto ambiental de la producción agrícola. Se concluye que la integración de este modelo puede mejorar significativamente la sostenibilidad del cultivo de aguacate, promoviendo una gestión eficiente de los recursos naturales y minimizando efectos negativos en el ecosistema.

Palabras clave: sostenibilidad agrícola, gestión ambiental, indicadores ambientales, cultivo de aguacate

MESBI: A Model of Sustainable Strategies for Agriculture

Abstract: The purpose of this research is to develop a Model of Sustainable Strategies Based on Indicators (MESBI), aimed at optimizing avocado production sustainably in the northern region of the state of Morelos, Mexico, during 2024. The model is based on environmental indicators that allow for evaluating the impact of agricultural practices and designing strategies focused on environmental conservation and efficient resource management. MESBI followed six stages: diagnosis, SMART objectives, indicator selection, implementation, continuous evaluation, and communication. An analysis of these indicators and a social intervention through surveys directed at 15 producers with more than 2 ha in Huitzilac (75 % of the locality) were carried out to identify critical areas for improvement and promote sustainable practices. Furthermore, a strategic map and an action plan with SMART goals were developed to conserve soil, preserve biodiversity, and optimize agrochemical use. The results highlight the value of environmental indicators for informed decision-making. Although most producers use agrochemicals, there is a willingness to adopt more responsible practices. MESBI provides a structured methodology that enables the evaluation and mitigation of the environmental impact of agricultural production. It is concluded that integrating this model can significantly improve the sustainability of avocado cultivation by promoting efficient management of natural resources and minimizing negative effects on the ecosystem.

Keywords: agricultural sustainability, environmental management, environmental indicators, avocado production

Introducción

Un Sistema de Gestión Ambiental (SGA) integra prácticas destinadas a prevenir la contaminación, cumplir la normativa y mejorar continuamente el desempeño ecológico de las organizaciones. Se trata de un conjunto de procesos y prácticas que ayudan a las organizaciones a identificar, evaluar y gestionar su impacto ambiental. El SGA permite a las empresas controlar los procesos que podrían generar daños al medio ambiente, minimizando dichos impactos y mejorando el rendimiento de sus operaciones (Acuña *et al.*, 2017). Su implementación no solo incrementa la competitividad y mejora la imagen corporativa, sino que también optimiza los recursos, facilita el diálogo con grupos de interés, evita sanciones legales, reduce riesgos y fomenta la innovación técnica (Rey, 2008).

Los indicadores ambientales son herramientas clave para estudios de la biodiversidad. Se definen como variables que sintetizan fenómenos complejos, que permiten monitorear la calidad ambiental a través de mediciones sistemáticas

en series temporales y espaciales (Therburg *et al.*, 2005). Estudios recientes han demostrado su valor para evaluar procesos ambientales y respaldar políticas sostenibles (Jiménez-Moreno *et al.*, 2019).

Diversos trabajos han abordado el diagnóstico ambiental en la agricultura, por ejemplo, estudios sobre prácticas agrícolas en el cultivo del maíz en Santa Catarina Tabernillas, Almoloya de Juárez (Martínez, 2022). Se utilizaron recorridos de campo, entrevistas, grupos focales y talleres para obtener diagnósticos ambientales precisos mediante análisis FODA. Ambos trabajos destacaron el programa “Producción para el Bienestar”, que, mediante asesoría técnica y promoción de la agroecología, fortalece comunidades rurales, preserva la soberanía alimentaria y el valor cultural de la agricultura.

En otro estudio se investigó la producción de aguacate en Chapa de Nuevo, Salvador Escalante, Michoacán, (Magallán Villalón, 2022). Se utiliza un muestreo intencionado y encuestas semiestructuradas. El diagnóstico agroambiental obtenido permitió identificar problemas y oportunidades para diseñar estrategias sostenibles en el manejo de recursos naturales.

La agricultura sustentable, que busca equilibrar la producción eficiente con la conservación de los recursos naturales, depende de factores como la experiencia, el conocimiento tecnológico y social, la escala de producción y la aplicación de Buenas Prácticas Agrícolas (López *et al.*, 2012; Aguilera Peña, 2022; Ruiz, 2023). Además, el uso de mapas estratégicos permite identificar directrices, optimizar la asignación de recursos y mejorar los procesos internos (Fellner, 2020; Ghiglione, 2021).

En este contexto, surge el Modelo de Estrategias Sostenibles Basado en Indicadores (MESBI), una herramienta que integra diagnósticos ambientales iniciales, objetivos SMART y monitoreo continuo para evaluar y mejorar la sustentabilidad en la producción agrícola. MESBI se diferencia de enfoques aislados al vincular indicadores específicos con estrategias de intervención, permitiendo una comunicación efectiva entre productores y actores clave (Luna, 2021).

Ante la ausencia de estrategias sustentables en la producción de aguacate, que ha derivado en la contaminación progresiva del suelo por el uso intensivo de plaguicidas y fertilizantes químicos, este estudio tiene como objetivo desarrollar e implementar el modelo MESBI para evaluar y optimizar la sostenibilidad en la producción de aguacate en Huitzilac, Morelos, México.

Las conclusiones obtenidas indican que el modelo MESBI permitió identificar áreas críticas para mejorar las prácticas agrícolas en Huitzilac. El empleo de indicadores ambientales facilitó una evaluación detallada del impacto ecológico y social de las actividades productivas, y la disposición de los productores evidenció un entorno favorable para la implementación del modelo. Para replicar MESBI en otras regiones, se recomienda establecer programas de capacitación que sensibilicen a los productores sobre los beneficios de las prácticas sostenibles, generar incentivos económicos o fiscales que promuevan la transición hacia técnicas más responsables y así, fortalecer alianzas con organismos internacionales como la FAO, para asegurar la transferencia de tecnología y conocimientos.

El enfoque de este modelo es aplicable a otros cultivos, como el café y el cacao, lo que podría contribuir significativamente a la optimización del uso de recursos y la reducción del impacto ambiental. Se sugiere realizar estudios piloto en zonas productivas distintas para validar su eficacia en diversos entornos. La Figura 1 representa las etapas clave del modelo, cada etapa incluye objetivos SMART que garantizan la sostenibilidad de la producción agrícola.



Figura 1. Modelo de Estrategias Sostenibles Basado en Indicadores (MESBI).

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en las huertas de aguacate en Huitzilac, Morelos, con el objetivo de evaluar y mejorar la producción sostenible de aguacates. La muestra se compone de 15 productores, lo que representa el 75% de los productores de la localidad, seleccionados por criterios de accesibilidad y disposición para participar en el proyecto. Esta estrategia permitió obtener información inmediata y focalizada sobre las condiciones actuales de la producción de aguacate, pero, se reconoce que el grupo analizado puede no ser representativo de la totalidad de los productores de la región. Por lo anterior, el diagnóstico presentado se considera preliminar; esta aproximación exploratoria resulta valiosa para identificar áreas críticas y establecer tendencias, sirviendo como base para estudios futuros que incluyan muestras más amplias para validar y generalizar los hallazgos obtenidos.

El diagnóstico inicial buscó identificar el estado actual de la producción y las principales áreas de oportunidad. Se observó que la mayoría de los productores utiliza formulaciones químicas o combinadas (pesticidas y fertilizantes) debido a su eficacia. Los productores seleccionados pertenecen a la localidad donde se tuvo acceso directo para realizar el estudio, lo que facilitó la recopilación de información.

Del mismo modo, para combatir las plagas, prefieren el método de fumigación foliar. También cabe destacar que los productores de aguacate son personas capacitadas y con experiencia, ya que la mayoría tiene conocimientos sobre la sustentabilidad, utilizan productos autorizados por la APEAM (Asociación de Productores y Empacadores Exportadores de Aguacate de México). Además, están dispuestos a participar en programas de certificación y sustentabilidad para mejorar la producción de aguacate en sus huertas.

Aplicación de la Metodología MESBI

La metodología del trabajo se basa en la herramienta MESBI, con la secuencia de actividades necesarias para organizar la recolección de datos, que serán analizados posteriormente para la generación de las estrategias sustentables. El Modelo MESBI integra la sustentabilidad en las estrategias empresariales mediante indicadores que miden el desempeño ambiental y social con las siguientes etapas:

1. Diagnóstico inicial: Se realizaron encuestas a 15 productores para identificar áreas de oportunidad y analizar las prácticas actuales.
2. Definición de objetivos: Se establecieron objetivos SMART (específicos, medibles, alcanzables, relevantes y con un plazo definido) en cada uno de ellos, estableciendo metas a corto, mediano y largo plazo, además deben estar alineados con la estrategia de la empresa.
3. Identificación de indicadores: Se seleccionaron métricas clave para evaluar aspectos como la calidad del suelo, la biodiversidad y el uso de agroquímicos. Estos indicadores evalúan el impacto ambiental, permitiendo ajustar estrategias con datos precisos para optimizar recursos y reducir daños al ecosistema.
4. Implementación de estrategias: Se promovieron acciones como la reducción de insumos dañinos y la adopción de técnicas sostenibles, para mejorar el desempeño de la empresa en cada una de las áreas identificadas.
5. Monitoreo y evaluación: Para asegurar que se están alcanzando los objetivos establecidos y que se están logrando mejoras en el desempeño de la empresa, los indicadores fueron evaluados continuamente para ajustar las estrategias según los resultados para asegurar que se está avanzando hacia la sustentabilidad.
6. Comunicación: Es importante comunicar los avances y los resultados obtenidos en la implementación de la estrategia de sustentabilidad por eso se mantuvo un diálogo constante con productores, clientes y actores clave para fomentar la adopción de prácticas sostenibles.

Para fortalecer el rigor metodológico del estudio, se establecieron criterios rigurosos para la selección y validación de los indicadores ambientales, así como para el análisis de la información recolectada. Cada indicador se eligió por su relevancia en la medición del impacto ambiental y social, su facilidad de obtención y su capacidad para detectar variaciones en las prácticas agrícolas. La validación de estos indicadores se realizó a través de una exhaustiva revisión de la literatura y consultas con expertos en el área, lo que aseguró tanto su pertinencia como su solidez científica.

El análisis de la información se realizó mediante técnicas estadísticas descriptivas y comparativas, lo que permitió identificar tendencias, variaciones y patrones significativos en los datos. Para ello, se procedió a la codificación de las

respuestas de la encuesta utilizando escalas de Likert, obteniéndose frecuencias, porcentajes y medidas de tendencia central que resumen de forma clara las características del fenómeno estudiado y el comportamiento de la muestra.

Adicionalmente, se efectuó un cruce sistemático de datos con estudios previos, permitiendo comparar los hallazgos actuales (por ejemplo, las prácticas de manejo de la huerta) con la información disponible en la literatura, lo que aporta un componente comparativo al análisis. Este proceso se llevó a cabo de manera continua, facilitando el ajuste de los indicadores a las condiciones específicas del entorno de estudio y garantizando así la validez de los resultados.

La confiabilidad del instrumento se comprobó mediante el coeficiente alfa de Cronbach, alcanzándose un valor de 0.86, lo que evidencia una excelente consistencia interna. Asimismo, cabe destacar que la selección de la muestra se realizó utilizando el método no probabilístico "Bola de Nieve", apropiado para abordar el estudio en el contexto específico de Huitzilac, Morelos.

En conjunto, la combinación de la síntesis cuantitativa de la información y la comparación sistemática con referencias bibliográficas respalda un análisis integral y riguroso. Estos procedimientos validaron y permitieron ajustar los indicadores ambientales propuestos en el marco del Modelo MESBI, asegurando que el enfoque metodológico se enmarca efectivamente dentro de las técnicas estadísticas descriptivas y comparativas empleadas en el estudio.

Resultados

Levantamiento de Datos

La encuesta se aplicó a 15 productores de aguacate con más de 2 hectáreas de terreno, a quienes denominamos participantes potenciales. Todos respondieron a la encuesta, que se administró en formato físico y cuyos datos se analizaron posteriormente en Excel.

El modelo propuesto, MESBI, es una herramienta de gestión ambiental diseñada para desarrollar indicadores y estrategias sustentables que optimicen los procesos y permitan alcanzar una producción de aguacate más sostenible.

Tras obtener las respuestas de cada productor en el diagnóstico aplicado, se analizan los datos en Excel para calcular la moda de cada pregunta y el porcentaje de las respuestas, como se muestra en la Tabla 1. La excepción es la pregunta 3, que es abierta. Este análisis permite proponer indicadores ambientales y estrategias sustentables para abordar las áreas de oportunidad identificadas.

Tabla 1. Análisis de datos

PREGUNTA	MODA(Respuesta)	PORCENTAJE
1. ¿Cuál es su rango de edad?	Más de 50 años	37 %
2. ¿Cuánto tiempo lleva en la producción de aguacate?	6 a 10 años	46 %
4. ¿Qué variedad de aguacate cultiva en su huerta?	Hass Flor de María	64 %
5. ¿Cuáles son los cuidados que usted aplica a la huerta de aguacate?	Monitoreo de enfermedades	64 %
6. ¿Qué tan importante considera la utilización de fertilizantes químicos de acuerdo con los resultados de análisis de suelo?	Muy importante	73 %
7. ¿Con qué frecuencia aplica fertilizantes?	3 veces al año	37 %
8. ¿Qué tipo de Fertilizante ocupan en el cuidado del aguacate?	Formulaciones Químicas	55 %
9. ¿Considera útil la aplicación de algún método para el control de plagas?	Muy Importante	73 %

Tabla 1 (Continuación). Análisis de datos

PREGUNTA	MODA(RESUESTA)	PORCENTAJE
10. ¿Qué métodos utilizan para el control de plagas?	Fumigaciones foliares (de acuerdo con el tipo de plaga)	100 %
11. ¿Con qué frecuencia se aplica el control de plagas?	Por recomendaciones técnicas	55 %
12. ¿Cuáles son los nutrientes más aplicados en la producción del aguacate?	Macronutrientes (Fósforo, Potasio y Nitrógeno) Micronutrientes (Magnesio, Manganeso, Zinc, Boro, Hierro)	100 %
13. ¿Qué tipo de análisis se realizan para determinar las necesidades nutricionales del aguacate?	Análisis de suelo	82 %
14. ¿Cuáles son las prácticas de riego que utilizan para el cultivo de aguacate?	Temporal	91 %
15. ¿Su fuente de agua para riego es utilizada además para otras actividades?	No	91 %
16. ¿Tiene idea de la cantidad de agua que utiliza para el riego?	Sí	82 %
17. ¿Qué hace con los desechos agrícolas (ramas, poda de arvenses, etc.) generados en la huerta de aguacate?	Compostaje	64 %
18. ¿Ha presentado erosión del suelo en su huerta?	No	91 %
19. ¿Qué medidas toma para evitar la erosión del suelo?	Mantener arvenses menor a 15 cm de altura	55 %
20. ¿Cuáles acciones realiza para conservar la biodiversidad (plantas, animales y microorganismos) en tu huerta?	Utilización de productos autorizados por APEAM	46 %
21. ¿Conoce qué es el desarrollo sostenible?	Sí	82 %
22. ¿Cómo considera la conservación del medio ambiente en la producción del aguacate?	Muy Importante	55 %
23. ¿Estaría dispuesto a participar en programas de certificación o sostenibilidad para mejorar la producción de aguacate?	Sí	100 %

Resultados cuantitativos más destacados

Del análisis de la Tabla 1 sobresalen los siguientes hallazgos: el 100 % de los productores utiliza fumigaciones foliares como método de control de plagas, mientras que el 82 % realiza análisis de suelo para ajustar la nutrición de sus parcelas. El 91 % no ha observado erosión del suelo y la misma proporción emplea riego temporal; no obstante, sólo el 46 % preserva la biodiversidad con productos autorizados por APEAM y el 55 % considera “muy importante” la conservación ambiental en su operación. Estas cifras confirman que, aunque existe una fuerte dependencia de agroquímicos (55 % formulaciones químicas y 73 % de productores califica su uso como “muy importante”), también hay apertura a prácticas de monitoreo y análisis de suelo.

Para evaluar la sostenibilidad en la producción de aguacate, se emplearon indicadores ambientales clave. En la Tabla 2 se presentan los principales indicadores analizados, su aplicación y su contribución a la toma de decisiones agrícolas.

Tabla 2. Indicadores ambientales seleccionados y sus acciones en el cultivo

Nombre del Indicador	Tipo de Indicador	Lugar de Aplicación	Acción que se Realiza	Aporte	Referencias
Calidad del Suelo	Ambiental	Suelo agrícola	Medición del pH, materia orgánica y estructura del suelo.	Evalúa la fertilidad y salud del suelo, optimizando el uso de fertilizantes y mejorando la productividad.	(Navarrete <i>et al.</i> , 2011); (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002); (García <i>et al.</i> , 2012).
Uso de Nutrientes	Ambiental	Suelo y tejido foliar	Monitoreo de macro y micronutrientes esenciales (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, B).	Permite ajustar la fertilización para optimizar el crecimiento y producción del cultivo.	(OECD, 1999); (Ríos-Castillo <i>et al.</i> , 2018); (Lazcano-Ferrat & Espinosa, 1998); (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002)
Minimización del uso de Pesticidas	Ambiental	Suelo y cultivos	Aplicación regulada de pesticidas siguiendo normas de seguridad.	Minimiza el impacto ambiental y en la salud humana, asegurando el cumplimiento de los límites máximos de residuos (LMR).	(OECD, 1999); (Campos <i>et al.</i> , 2017); (Diario Oficial de la Federación, 2017); (FAO, 2019).
Minimización del uso de Fertilizantes Químicos	Ambiental	Suelo y base de la planta	Implementación de buenas prácticas en la fertilización.	Mejora la calidad del suelo y la producción agrícola, optimizando el uso de fertilizantes.	(Romero, 2022); (Agricultura y Desarrollo rural, 2022); FAO, 2019; FAO, 2002

Diseño de Estrategias

Partiendo de estos resultados, se desarrolló un mapa estratégico sustentable que prioriza la conservación del suelo, la biodiversidad y el manejo adecuado de agroquímicos, al tiempo que impulsa el fortalecimiento de competencias mediante la capacitación y certificación de los productores. Estas estrategias, diseñadas para equilibrar la producción eficiente con la protección ambiental y el bienestar social, se plasman en un modelo unificado y organizado (Figura 2) fundamentado en distintos grados de acción. El mapa Estratégico se estructura en cuatro áreas clave, cada una con sus propias estrategias y metas específicas, orientadas a incrementar la sostenibilidad en la agricultura.

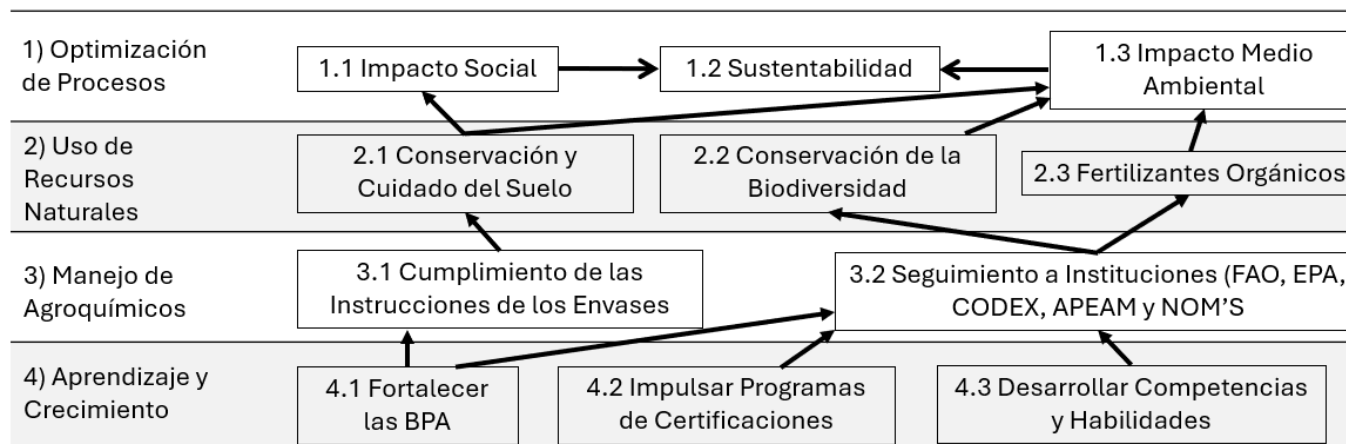


Figura 2. Mapa Estratégico de Sostenibilidad Agrícola

Cada parte del mapa está vinculada, garantizando que la producción sea más eficaz, respetuosa con el medio ambiente y socialmente equitativa. Este mapa estratégico actúa como una guía para la implementación de mejoras en la gestión agrícola, facilitando el diseño de estrategias particulares de sustentabilidad en huertos o cultivos. Además permite la evaluación y/o modificación del rendimiento de los procesos productivos, garantizando un uso eficaz de los recursos fomentando prácticas responsables del sector agrícola.

Resultados del análisis del mapa estratégico propuesto

Este mapa permite visualizar las interdependencias entre los cuatro niveles de acción y facilita la priorización de intervenciones. A continuación, se describe el análisis de cada punto del mapa estratégico y su área de impacto:

1. Optimización de Procesos:

- 1.1. Impacto Social: Este punto se refiere a los efectos positivos en la comunidad, como la mejora de condiciones laborales dentro de la huerta, el bienestar social, así como el trabajo en conjunto tanto hombres como mujeres para obtener beneficios sociales derivados a las prácticas agrícolas sustentables.
- 1.2. Sustentabilidad: Representa el objetivo principal del mapa, que es alcanzar un equilibrio entre el desarrollo social y ambiental.
- 1.3. Impacto Ambiental: Principalmente se enfoca en reducir el impacto negativo sobre el medio ambiente, a través de buenas prácticas y el máximo aprovechamiento de los recursos naturales.

2. Uso de Recursos Naturales:

- 2.1. Conservación y Cuidado del Suelo: Se enfatiza en la salud del suelo para prevenir su degradación en las prácticas agrícolas, mejorar o mantener su fertilidad a largo plazo.
- 2.2. Conservación de la Biodiversidad: Implica en la protección de la diversidad biológica, manteniendo la preservación de especies y ecosistemas.
- 2.3. Fertilizantes Orgánicos: Promueve el uso de fertilizantes naturales que son más amigables para el medio ambiente que los fertilizantes químicos, contribuyendo así a la salud del suelo y reduciendo la contaminación.

3. Manejo de Agroquímicos:

- 3.1. Cumplimiento a las Instrucciones de los Envases: Destaca en la importancia de seguir las instrucciones al momento de utilizar productos agroquímicos para minimizar riesgos para la salud y el medio ambiente.
- 3.2. Seguimiento a Instituciones (EPA, CODEX, APEAM, NOM's): Asegura que las prácticas agrícolas cumplan con los estándares establecidos por organizaciones nacionales e internacionales, garantizando así la seguridad y calidad.

4. Aprendizaje y Crecimiento:

- 4.1. Fortalecer las BPA: Se enfoca en mejorar y aumentar la eficiencia en las prácticas agrícolas, garantizando productos de alta calidad y minimizando un impacto ambiental negativo.
- 4.2. Impulsar Programas de Certificaciones: Promueve la obtención de certificaciones que validen la sustentabilidad en la producción, mejorando sus procesos, aumentar la confianza del consumidor y así abriéndose a nuevos mercados.
- 4.3. Desarrollar Competencias y Habilidades: Se centra en la capacitación y desarrollo continuo de los trabajadores y productores para fortalecer sus conocimientos y técnicas, adaptándose a nuevas tecnologías y métodos.

Análisis del Entorno y Clasificación de la Información

Es evidente que los productores de aguacate son personas capacitadas y con experiencia, ya que la mayoría tiene conocimientos sobre el desarrollo sustentable. Utilizan productos autorizados por la APEAM, previenen la erosión del suelo y realizan compostaje con los desechos orgánicos generados en la producción de aguacate. Además, están dispuestos a participar en programas de certificación y sustentabilidad para mejorar la producción de aguacate.

Sin embargo, una de las áreas de oportunidad identificadas en el diagnóstico es el uso de fertilizantes. Los productores consideran de gran importancia el uso de formulaciones químicas o combinadas, siendo este el método más utilizado. Del mismo modo, para combatir las plagas, prefieren el método de fumigación foliar.

Plan Estratégico

En la Fig. 3, se presenta el Plan de Estrategias Propuestas (Plan Estratégico), muestra el proceso a seguir para lograr la Sustentabilidad en la Producción de Aguacate, en poblado de Huitzilac, Morelos:

- Capacitación y asistencia técnica continua a los productores de aguacate de la región en Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), con el fin de mejorar la calidad del cultivo.
- Impulso a programas de certificación, para que los productores adquieran nuevas competencias y habilidades, otorgando un valor agregado al mercado del aguacate que valora la sustentabilidad.
- Seguimiento de normativas y estándares internacionales y locales, como los de la FAO, EPA, CODEX ALIMENTARIUS, APEAM y las normativas locales (NOM's), para asegurar el cumplimiento de los estándares de seguridad alimentaria.
- Implementación de prácticas de conservación del suelo, como la gestión de residuos (compostaje) y la cobertura vegetal, para mantener la fertilidad y reducir la erosión.
- Instalación de sistemas de riego por goteo y almacenamiento de agua de lluvia, maximizando su uso en temporadas secas, lo que ayuda a evitar la erosión y reducir el consumo de agua.

Estas estrategias buscan optimizar la producción de aguacate de manera sostenible reducir el impacto ambiental negativo y generar conciencia en la sociedad sobre el buen uso y aprovechamiento de los recursos naturales (Comas-Rodríguez *et al.*, 2014; Ghiglione, 2021; Cañar-Rivera *et al.*, 2020). Con la información recopilada, se desarrolló un plan estratégico (Figura 3) que presenta las propuestas de manera clara y accesible para los productores de aguacate, garantizando una comunicación efectiva y comprensible.



Figura 3. Plan Estratégico para la producción sostenible de aguacate

Nuestros resultados respaldan la hipótesis H1 —los indicadores ambientales detectan áreas críticas—, ya que la medición del pH reveló que un 64 % de las parcelas opera fuera del rango óptimo 6,0–7,0, coincidiendo con estudios de la (OECD, 1999) y de (Magallán Villalón, 2022) en Michoacán. Además, la apertura al análisis de suelo y a programas de certificación valida la hipótesis H2 sobre la disposición de los productores a adoptar prácticas sostenibles, acorde con lo observado por (Jiménez-Moreno *et al.*, 2019) en cultivos de café. La elección mayoritaria de riego temporal —también reportada por (Martínez, 2022) en Tabernillas— puede responder a limitaciones de infraestructura, lo cual sugiere la necesidad de investigar sistemas de riego tecnificado como goteo (FAO, 2002).

Discusión

Los resultados no solo confirman la capacidad de MESBI para identificar áreas críticas (como el pH subóptimo y la dependencia de pesticidas), también implican un cambio de paradigma en la gestión de huertos de aguacate en Morelos. Mientras que los diagnósticos previos, como los de (Martínez; 2022) o (Magallán Villalón, 2022), se limitaron a asesoría técnica puntualizada, MESBI traduce esas recomendaciones en objetivos SMART y en un mapa estratégico que da prioridad a acciones con plazos y responsables claros. Las intervenciones dejan de ser reactivas para convertirse en procesos dinámicos y medibles, capaces de adaptarse en tiempo real a variaciones en el entorno, por ejemplo ajustando indicadores de riego o materia orgánica a la primera evidencia de desequilibrio. En la práctica, este enfoque estructurado facilita una adopción más ágil de Buenas Prácticas Agrícolas y fomenta la rendición de cuentas de los actores involucrados, elevando la sostenibilidad de la producción de aguacate más allá de lo logrado con metodologías tradicionales. Estos hallazgos respaldan la hipótesis H1, al demostrar que los indicadores permiten detectar áreas críticas como el desequilibrio del pH y el uso intensivo de insumos químicos; también se valida la hipótesis H2 al evidenciar la apertura de los productores hacia prácticas sostenibles. Esta validación empírica proporciona una base sólida para futuras investigaciones, especialmente aquellas que busquen implementar MESBI en diferentes contextos o evaluar su impacto social y económico a mediano plazo.

Limitaciones del estudio

Este estudio emplea un muestro no probabilístico de “bola de nieve” aplicado a 15 productores, lo que limita la representatividad estadística y puede generar sesgos de selección. Al ser un diseño “No experimental y transversal”, no permite establecer causalidad ni evaluar la variación estacional de indicadores como humedad y temperatura. El usar encuestas en formato físico y análisis en Excel, hay un riesgo de errores de transcripción. Futuras investigaciones podrían reducir estas limitaciones implementando muestreos aleatorios estratificados, herramientas digitales de recolección de datos y diseños de seguimiento a lo largo de varias temporadas agrícolas.

Líneas de investigación futura

Para profundizar, se proponen estudios longitudinales de 2 años que evalúen la evolución del pH y la materia orgánica tras la aplicación de compostaje y biofertilizantes. También, sería importante comparar la eficacia de MESBI en otro tipo de cultivos (como el café o cacao) y con regiones con muestras mayores, al menos 30 o más productores, para poder validar su generalidad. Otro enfoque futuro es incorporar un análisis de costo-beneficio para cuantificar el impacto económico de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) y el retorno de inversión de sistemas de riego tecnificado. Se recomienda explorar variables sociales y culturales, como género, nivel educativo, para desarrollar programas de capacitación acordes a las variables encontradas.

Conclusiones

El modelo MESBI permitió identificar áreas críticas para mejorar las prácticas agrícolas en Huitzilac, Morelos. Los indicadores ambientales facilitaron una evaluación detallada del impacto ecológico y social de las actividades productivas, mientras que la disposición de los productores sugiere un entorno favorable para su implementación. Para replicar este modelo en otras regiones, se recomienda:

- Establecer programas de capacitación para sensibilizar a productores sobre los beneficios de prácticas sostenibles.
- Generar incentivos económicos o fiscales que promuevan la transición hacia técnicas más responsables.

- Fortalecer las alianzas con organismos internacionales, como la FAO, para garantizar la transferencia de tecnología y conocimiento.

El modelo MESBI presenta un enfoque que se puede replicar en otros cultivos como el café y el cacao, donde la gestión sostenible de suelos y agroquímicos es fundamental. Su aplicación en diferentes regiones podría contribuir significativamente a la optimización del uso de los recursos y la reducción del impacto ambiental. Para validar la eficacia del modelo en otros entornos, se recomienda realizar estudios piloto en distintas zonas productivas.

Agradecimientos y financiamiento: A CONACYT por financiar el Proyecto (1270351) del Programa de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables, en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. Especial reconocimiento al Grupo de Productores "QUIAUHTZIN" por su apoyo en la investigación de campo y a las Dras. Irene de la Concepción Perea Arango, Ma. del Carmen Torres Salazar y Mtra. Elizabeth Millán Benítez por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

Bibliografía

- Acuña, N., Figueroa, L., & Wilches, M. J. (2017). Influencia de los sistemas de gestión ambiental ISO 14001 en las organizaciones: Caso estudio empresas manufactureras de Barranquilla. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 25(1), 143–153.
- Aguilera Peña, R. (2022). Estrategias agroecológicas para una agricultura sostenible. *Revista Científica Ecociencia*, 9, 138–150. <https://doi.org/10.21855/ecociencia.90.758>
- Cañar-Rivera, J. P., Urgiles-Vicuña, J. H., Ochoa-Crespo, J. D., & Torres-Palacios, M. M. (2020). El mapa estratégico en las organizaciones públicas. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 5(3), 518–543. <https://doi.org/10.35381/r.k.v5i3.910>
- Campos, J. R., Reyes, E. A., & Lugo, C. E. C. (2017). Inocuidad en aguacate. En *Inocuidad y trazabilidad en los alimentos mexicanos*. CIATEJ, Guadalajara, Jalisco, México. <http://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1023/634>
- Comas-Rodríguez, R., Nogueira-Rivera, D., & Medina-León, A. (2014). El control de gestión y los sistemas de información: Propuesta de herramientas de apoyo. *Ingeniería Industrial*, 35(2), 21.
- Diario Oficial de la Federación. (2017). *NOM-082-SAG-FITO/SSA1-2017: Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos de residuos, lineamientos técnicos y procedimiento de autorización y revisión* (pp. 4–228).
- FAO. (2002). *World fertilizer use manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2019). *Código internacional de conducta para el uso y manejo de fertilizantes*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fellner, A. (2010). Introducción a los mapas estratégicos. *Enfoques*, 4, 25–33. Universidad Nacional de Salta. https://biblioeco.unsa.edu.ar/pmb/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=6757
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: Una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125–138. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001&lng=es&tling=es
- Ghiglione, F. A. (2021). El cuadro de mando integral como herramienta de eficiencia en la gestión empresarial. *Ciencias Administrativas*, 18, 87–93. <https://doi.org/10.24215/23143738e088>
- Jiménez-Moreno, M. J., Rodríguez-Laguna, R., Escalona-Maurice, M. J., Razo-Zárate, R., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2019). Análisis de indicadores ambientales espacio-temporales de agua, suelo y vegetación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1641–1652. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i7.1806>
- Lazcano-Ferrat, I., & Espinosa, J. (1998). Manejo de la nutrición del aguacate. *Informaciones Agronómicas*, 3, 3–6.
- López, E. G., Guampe, C. P., Melgarejo, L. M., & Carvajal, L. H. (2012). Manejo agronómico de gulupa (*Passiflora edulis* Sims) en el marco de las buenas prácticas agrícolas. En *Ecofisiología del cultivo de la gulupa (Passiflora edulis Sims)*, 123.
- Luna, R. N. S. (2021). *M.E.S.B.I. Una nueva herramienta de gestión* [Video en línea]. Colegio Nacional de Ingenieros Industriales, A.C. <https://www.youtube.com/watch?v=jsRITBjdtCY>
- Magallán Villalón, J. J., Bautista Hernández, M. Á., & Herrera Camacho, J. (2022). *Producción de aguacate en la localidad Chapa de Nuevo, municipio de Salvador Escalante Michoacán, México*. UNAM-AMECIDER. ISBN: 978-607-30-6938-0.
- Martínez, D. R. (2022). *Diagnóstico ambiental de las prácticas agrícolas en parcelas cultivadas con maíz en Santa Catarina Tabernillas, Almoloya de Juárez, México*. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/137438>
- Navarrete, A., Vela, G., López, J., & Rodríguez, M. D. L. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Revista Contactos*, 80, 29–37.
- OECD. (1999). *Environmental indicators for agriculture: Concepts and framework* (Vol. 1). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264173873-en>
- Rey, C. (2008). Sistemas de gestión ambiental. *Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental*, 7, 42. Escuela de Negocios. <https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/componente45760.pdf>
- Ríos-Castillo, I., Acosta, E., Samudio-Núñez, E., Hruska, A., & Gregolin, A. (2018). Beneficios nutricionales, agroecológicos y comerciales de las legumbres. *Revista Chilena de Nutrición*, 45, 8–13. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182018000200008>
- Romero, O. D. (2022). *Impacto del uso de fertilizantes químicos en la producción del cultivo de naranja (Citrus sinensis L.)* [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/11317>
- Ruiz, R. O. (2023). *Estrategias agroalimentarias sostenibles como respuesta al deterioro ambiental en el territorio de la Frailesca, Chiapas, México*. Universidad Autónoma de Chapingo. <https://doi.org/10.35197/rx.19.03.2023.03.rr>
- Salgado Sánchez, R. (2015). Agricultura sustentable y sus posibilidades en relación con consumidores urbanos. *Estudios Sociales (Hermosillo, Son.)*, 23(45), 113–140. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-45572015000100005&lng=es&tling=es

- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (s. f.). *¿Qué tanto sabes del pH del suelo?* <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/que-tanto-sabes-del-ph-del-suelo>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *NOM-021-RECNAT-2000: Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*, 13–58.
- Therburg, A., D'Inca, V., & López, M. (2005). Modelo de indicadores ambientales: Observatorio ambiental. *Proyección*, 3, 17. <https://bdigital.uncu.edu.ar/3152>

Diseño Óptimo de un Sistema de Tratamiento de Efluentes Acuosos Contaminados con Cromo Hexavalente Mediante una Cinética de Reducción en Estado Transitorio

Adrián López-Yañez *, Estefanía Godoy-Colin, Gastón Martínez-De Jesús, Yoyce Obando-Galicia y José Alfredo Parra-Reyes

División de Ingeniería Química y Bioquímica, TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Ecatepec 55210, Estado de México, México

* Adrian López Yañez: loya8305@gmail.com; Tel.: 5514680064

Diseño de Procesos Sustentables (Simulación y Dinámica de Sistemas)

Recibido: 23 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 31 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.627>

Resumen: El tratamiento de efluentes acuosos contaminados con metales pesados es un desafío prioritario en la ingeniería debido a los graves riesgos que representan para la salud y los ecosistemas. Entre ellos, el cromo hexavalente es uno de los contaminantes más peligrosos por su elevada movilidad, persistencia y bioacumulación. Su exposición prolongada provoca daños renales, hepáticos, respiratorios y efectos carcinogénicos. Las normas mexicanas establecen límites estrictos para descargas, fijando 0.5 mg/L para cromo total y valores cercanos a 0.05 mg/L en referencia a estándares internacionales. El diseño de sistemas distribuidos de tratamiento constituye una alternativa eficiente frente a esquemas centralizados, al integrar unidades modulares que reducen costos de transporte, mejoran la flexibilidad y permiten el control localizado de contaminantes. Para optimizar estos sistemas se aplican herramientas de programación matemática: lineal, no lineal, mixta-entera y dinámica, que permiten resolver balances, seleccionar tecnologías y evaluar escenarios temporales. Diversas tecnologías han mostrado eficacia en la remoción de metales pesados, destacando la precipitación química, el intercambio iónico, la adsorción y el uso de membranas. En este trabajo se empleó un proceso electroquímico documentado en la literatura científica ya que se han consolidado como métodos promisorios para el tratamiento de cromo hexavalente Cr(VI) y que permiten la reducción a cromo trivalente Cr(III), menos tóxico y más fácilmente removible. Además, se desarrolló un modelo matemático de optimización dinámica (OD) para la integración de tecnologías de tratamiento avanzadas, como los procesos electroquímicos, que permite representar un enfoque integral para el diseño de sistemas distribuidos sostenibles. Finalmente, el OD se implementó en el sistema de Matlab usando un caso de estudio académico.

Palabras clave: optimización, tratamiento, efluentes, cinética, electroquímica, reducción

Optimal Design of an Aqueous Effluent Treatment System Using Transient State Hexavalent Chromium Reduction Kinetics

Abstract: The treatment of aqueous effluents contaminated with heavy metals is a priority engineering challenge due to the serious risks they pose to health and ecosystems. Among these, hexavalent chromium is one of the most dangerous pollutants due to its high mobility, persistence, and bioaccumulation. Prolonged exposure causes kidney, liver, and respiratory damage, as well as carcinogenic effects. Mexican regulations establish strict limits for discharges, setting 0.5 mg/L for total chromium and values close to 0.05 mg/L in reference to international standards. The design of distributed treatment systems constitutes an efficient alternative to centralized systems, by integrating modular units that reduce transportation costs, improve flexibility, and allow for localized control of pollutants. To optimize these systems, linear, nonlinear, mixed-integer, and dynamic mathematical programming tools are applied, allowing for the resolution of balances, the selection of technologies, and the evaluation of time-based scenarios. Various technologies have proven effective in removing heavy metals, including chemical precipitation, ion exchange, adsorption, and membranes. This work used an electrochemical process from the scientific literature, as they have proven promising methods for treating hexavalent chromium (Cr(VI)) and allow its reduction to trivalent chromium (Cr(III), which is less toxic and more easily removable). Furthermore, a dynamic optimization mathematical model (DO) was developed for the integration of advanced treatment technologies, such as electrochemical processes, which provides a comprehensive approach to the design of sustainable distributed systems. Finally, the DO was implemented in Matlab using an academic case study.

Keywords: optimization, treatment, effluents, kinetics, electrochemistry, reduction

Introducción

El tratamiento de efluentes acuosos es un desafío crucial en la ingeniería ambiental, particularmente cuando estos contienen metales pesados de alta toxicidad. Entre ellos, el cromo en su estado hexavalente (Cr(VI)) se reconoce como uno de los contaminantes más peligrosos debido a su alta movilidad en medios acuosos superficiales y subterráneos,

su persistencia ambiental y su capacidad de bioacumulación, afectando tanto la biodiversidad acuática como la calidad de los recursos hídricos para consumo humano e industrial (Owlad *et al.*, 2009). La exposición prolongada a Cr(VI) produce efectos adversos severos en la salud humana, que incluyen daño renal y hepático, alteraciones respiratorias, dermatitis crónica, así como un alto potencial cancerígeno (Kimbrough *et al.*, 1999; ATSDR, 2012).

En México, el marco normativo más actualizado sobre descargas de aguas residuales se encuentra en la NOM-001-SEMARNAT-2021, donde se establecen límites máximos permisibles para contaminantes prioritarios, incluyendo metales pesados. Para el caso del cromo, los valores de referencia dependen del tipo de cuerpo receptor y del uso del agua. En general, el límite máximo permitido para cromo total se fija en 0.5 mg/L para descargas en cuerpos receptores de agua dulce de uso público, mientras que para cromo hexavalente los valores tienden a ser más estrictos (SEMARNAT, 2021; WHO, 2017). Estas disposiciones reflejan la importancia de implementar tecnologías de tratamiento avanzadas y optimizadas que garanticen el cumplimiento normativo y la protección de la salud pública y ambiental.

El desarrollo de sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes acuosos se presenta como una estrategia prometedora para enfrentar este reto. A diferencia de los sistemas centralizados, los esquemas distribuidos permiten la integración flexible de unidades de tratamiento en distintos puntos de la red de generación de aguas residuales, lo que favorece la reducción de costos de transporte, la mejora en la eficiencia operativa y la posibilidad de un control localizado de contaminantes específicos (El-Halwagi, 2017). En el caso particular de los metales pesados, esta aproximación permite diseñar combinaciones de operaciones unitarias (precipitación química, intercambio iónico, adsorción en materiales avanzados, membranas selectivas, entre otras) de manera modular y escalable (Fu & Wang, 2011).

Para lograr un diseño eficiente de estos sistemas, se emplean técnicas de programación matemática que permiten evaluar de forma sistemática múltiples configuraciones y escenarios operativos. Dentro de este marco, se distinguen diversas herramientas: la programación lineal (LP) resulta útil para problemas donde las relaciones entre variables son proporcionales y lineales; la programación no lineal (NLP) aborda casos más realistas donde las relaciones son no proporcionales; la programación mixta-entera (MILP/MINLP) es indispensable para redes de tratamiento distribuidas al considerar decisiones binarias (instalar o no una unidad) junto con variables continuas; y la optimización dinámica incorpora la variación temporal de cargas contaminantes y condiciones de operación, garantizando diseños robustos frente a escenarios cambiantes (Grossmann & Guillén-Gosálbez, 2010).

En este contexto, las tecnologías de tratamiento de metales pesados han evolucionado significativamente. Los procesos tradicionales como la precipitación química o el intercambio iónico siguen siendo relevantes, pero presentan limitaciones en eficiencia y generación de residuos secundarios (Fu & Wang, 2011). En contraste, los métodos avanzados, particularmente los electroquímicos, se han posicionado como alternativas de alta eficiencia y sostenibilidad. Técnicas como la electrocoagulación, la electrorreducción de Cr(VI) a Cr(III) y la electrodialisis permiten una remoción más efectiva, con menor consumo de reactivos químicos y potencial de regeneración de electrodos y soluciones (Sharma *et al.*, 2019; Martínez-Huitle & Brillas, 2009). Además, la combinación de tecnologías electroquímicas con adsorbentes avanzados o membranas híbridas ofrece posibilidades de optimización tanto técnica como económica (Golder *et al.*, 2007).

La síntesis de sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes con énfasis en contaminantes tóxicos como el cromo hexavalente no solo implica un reto técnico, sino también económico y regulatorio. La combinación de herramientas de programación matemática con información normativa y de impacto ambiental constituye un enfoque integral para desarrollar soluciones sustentables. Dichos sistemas buscan minimizar el costo total de tratamiento, cumplir con los estándares ambientales más estrictos y, al mismo tiempo, reducir el riesgo asociado a la presencia de contaminantes altamente tóxicos en los cuerpos de agua.

En síntesis, el diseño óptimo de sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes acuosos mediante herramientas de programación matemática constituye un área de investigación clave para enfrentar problemas ambientales contemporáneos. Su aplicación en el manejo de metales pesados, particularmente el cromo hexavalente, representa un avance hacia la implementación de estrategias más eficientes y sostenibles, que no solo protegen la salud de la población y el equilibrio ecológico, sino que también favorecen la competitividad de los sectores productivos mediante el cumplimiento regulatorio y la reducción de costos asociados al tratamiento de aguas residuales.

En este trabajo, se propone un caso de estudio académico en función del trabajo presentado por Rodríguez *et al.* (2008) y se desarrolló un modelo matemático de optimización dinámica (OD) usando tasas de remoción variables.

Materiales y Métodos

Planteamiento del problema

Se debe tratar un conjunto de cuatro corrientes efluentes S_i , donde $i = \{1, 2, 3, 4\}$ con sus respectivas concentraciones de cromo hexavalente $C_{i,j}$, donde $j = \{1\}$ en dos reactores electroquímicos continuos de tanque agitado UT_n donde $n = \{1, 2\}$ para la reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente usando los balances de masa en estado transitorio con reacción química de la Ecuación 1 presentados por Rodríguez *et. al.* (2008) que incluyen una cinética de orden variable.

$$\frac{d}{dt} cout_n = \frac{Q_n}{V_n} (cin_n - cout_n) - \frac{Ae^{aI_n} cout_n}{1 + Be^{-bI_n} cout_n} \quad (1)$$

La concentración ($c_{j,e}$) del flujo (Fe) en el punto de descarga debe cumplir con la norma ambiental ($c_{j,e}^U$) para su descarga en el alcantarillado. En la Tabla 1 se presentan los parámetros del sistema de tratamiento y del modelo cinético, así como las cotas inferior y superior para el volumen (v_n) del reactor y de la densidad de corriente (I_n).

Tabla 1. Parámetros del modelo matemático de programación no lineal

Datos de las Corrientes efluentes			Parámetros del modelo cinético			
i	S_i (L/min)	$C_{i,j}$ (mg/L)	Modelo cinético		Cota inferior (L)	Cota superior (U)
1	3	350	$A = 0.7483$	Densidad de corriente I_n	$I^L = 190 \text{ A/m}^2$	$I^U = 350 \text{ A/m}^2$
2	5	450	$B = 0.1772$	Volumen del reactor V_n	$V^L = 0 \text{ L}$	$V^U = 1250 \text{ L}$
3	7	500	$a = 0.001$			
4	9	570	$b = 0.003$			
$Fe = \sum_{i=1} S_i = 24$			$c_{j,e}^U = 0.5$			

Superestructura y nomenclatura

Los sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes se pueden diseñar a partir de una superestructura que engloba las diferentes posibilidades de diseño topológico, por lo que su desarrollo es de gran utilidad durante la síntesis de sistema de tratamiento. En la Figura 1 se presenta la superestructura para el tratamiento de efluentes acuosos la cual se compone de divisores (círculos negros), mezcladores (círculos sin relleno) y unidades de tratamiento (cuadros), donde la sección A corresponde a las fuentes generadoras de corrientes efluentes (S_i) que provienen de algún proceso; la sección B corresponde a las unidades de tratamiento (UT_n) (reactores electroquímicos) y son alimentadas por las fracciones de flujo que derivan de las fuentes ($f_{i,n}$), a su vez, las UT_n también pueden ser alimentadas por una estructura de recirculación a partir de la misma unidad de tratamiento ($G_{n,n}$) y a partir de otra diferente ($G_{n',n}$). Por otra parte, el flujo que pasa a través de una unidad de tratamiento es Q_n con concentraciones de entrada y salida cin_n y $cout_n$ respectivamente. Finalmente, el flujo F_e corresponde al flujo en el punto de descarga (e) con concentración c_{je} y puede ser alimentado por las fuentes i y las

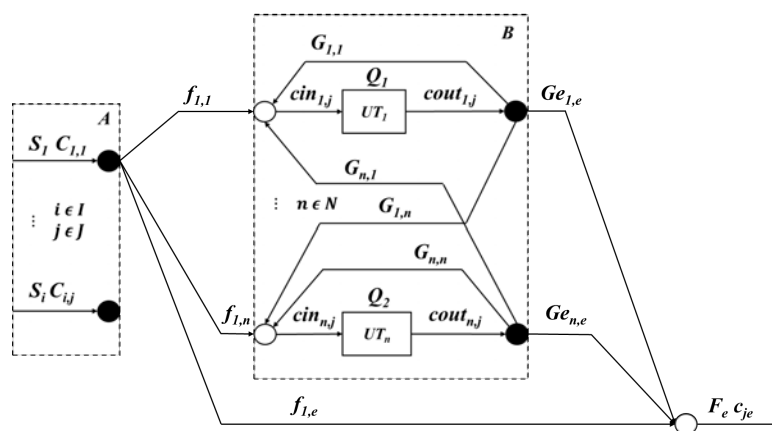


Figura 1. En esta figura se presenta la superestructura para el diseño de un sistema de tratamiento de efluentes

unidades de tratamiento n , $f_{i,e}$ y $Ge_{n,e}$ respectivamente; por lo tanto, el conjunto de las fuentes de corrientes efluentes es $\{i \in I\}$ y el conjunto de unidades de tratamiento es $\{n \in N\}$. En este trabajo, el conjunto de contaminantes $\{j \in J\}$ y el de los puntos de descarga $\{e \in E\}$ solo tienen un elemento ya que se trabaja con solo un contaminante (cromo hexavalente) y un solo punto de descarga.

Modelo de programación matemática no lineal (PNL)

El modelo de programación no lineal consiste de balances de materia realizados en cada unidad de operación, de acuerdo a la superestructura de la Figura 1. Los balances globales en los divisores (círculos negros) posteriores a las fuentes i se presentan en la ecuación 2:

$$S_i = f_{i,n} + f_{i,e} \quad i \in I \quad (2)$$

En la Ecuación 3 y Ecuación 4 se presentan los balances de materia globales y parciales en los mezcladores (círculos sin relleno) previos a las unidades de tratamiento UTn:

$$Q_n = \sum_{i=1} f_{i,n} + \sum_{n'=1} G_{n',n} \quad n \in N \quad (3)$$

$$cin_n Q_n = \sum_{i=1} C_{i,j} f_{i,n} + \sum_{n'=1} cout_{n'} G_{n',n} \quad n \in N; j \in J \quad (4)$$

En la Ecuación 5 se muestran los balances de materia globales en el divisor (círculos negros) posteriores a las unidades de tratamiento UTn:

$$Q_n = \sum_{e=1} Ge_{n,e} + \sum_{n'=1} G_{n,n'} \quad n \in N \quad (5)$$

Finalmente, en la Ecuación 6 y Ecuación 7 se presentan los balances de materia global y parcial en el mezclador (círculo sin relleno) del punto de descarga de la superestructura (ver Figura 1):

$$F_e = \sum_{i=1} f_{i,e} + \sum_{n=1} Ge_{n,e} \quad e \in E \quad (6)$$

$$c_{j,e} F_e = \sum_{i=1} C_{i,j} f_{i,e} + \sum_{n=1} cout_n Ge_{n,e} \quad e \in E; j \in J \quad (7)$$

La restricción para la descarga de cromo hexavalente en el alcantarillado se establece a continuación:

$$c_{j,e} \leq c_{j,e}^U \quad j \in J; e \in E \quad (8)$$

Las restricciones para las variables de decisión del modelo PNL se establecen a continuación:

$$f_{i,n} \leq S_i \quad i \in I \quad (9)$$

$$f_{i,e} \leq S_i \quad i \in I; e \in E \quad (10)$$

$$Q_n \leq F_e \quad i \in I \quad (11)$$

$$cin_n \leq \text{Max}\{C_{i,j}\} \quad i \in I; j \in J \quad (12)$$

$$cout_n \leq \text{Max}\{C_{i,j}\} \quad i \in I; j \in J \quad (13)$$

$$G_{n,n'} \leq F_e \quad n \in N; n' \in N \quad (14)$$

El modelo de programación dinámica (PD) se compone de la Ecuación 1 a la Ecuación 7 junto con las restricciones y las cotas de la Tabla 1, además se establece que las variables de decisión son positivas.

Para simplificar el problema abordado, se utiliza una función objetivo que minimiza el flujo en cada unidad de tratamiento, bajo la suposición de que el costo de tratamiento es proporcional al flujo.

De forma esquemática se presenta el modelo PD:

$$\text{Min } Z = Q_1 + Q_2$$

Sujeto a

Ecuación 1 a Ecuación 7

Restricciones de desigualdad de 8 a 14

Variables de decisión positivas

Resultados y Discusión

El modelo PNL se implementó en el sistema de Matlab usando la función *fmincon*, junto con el modelo de la Ecuación 1 y cuenta con 29 variables y 14 ecuaciones dando un total de 15 grados de libertad. En la Tabla 2 se muestran los resultados de las variables de decisión, se puede observar que una fracción de la corriente S_1 es tratada en la UT_1 y la otra fracción es tratada en UT_2 , para las corrientes S_2 , S_3 y S_4 son tratadas en la UT_1 cuyo flujo Q_1 es de 23.322 L/min en donde la concentración de entrada cin_1 es de 501.357 mg/L y la concentración de salida $cout_1$ es de 17.945 mg/L, se observa que esta concentración no cumple con la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece 0.5 mg/L para su descarga en los cuerpos receptores, por lo que es enviada a la segunda unidad de tratamiento UT_2 en donde el flujo Q_2 es de 24 L/min con concentración de entrada cin_2 es de 27.322 mg/L y la concentración de salida $cout_2$ es de 0.5 mg/L cumpliendo así con la norma ambiental. Cabe mencionar que, al tener una norma ambiental muy restrictiva para el cromo hexavalente, se obliga a tratar completamente cada corriente efluente.

Por otra parte, en la Tabla 2 también se presentan los resultados de las variables de volumen V_1 y V_2 y de la densidad de corriente eléctrica I_1 e I_2 los cuales están incluidos en el balance de masa en estado transitorio con reacción química de la Ecuación 1, los cuales igualan a sus cotas superiores para lograr cumplir con la norma ambiental.

En la Figura 2 se presenta el modelo dinámico de la Ecuación 1, donde se puede observar que el perfil de concentraciones alcanza su estado estacionario cercano a los 18 mg/L considerando que inicio con 501.357 mg/L (Figura 2a), por otra parte, en la segunda unidad de tratamiento el flujo entra con una concentración inicial cercana a 27 mg/L y alcanzar su estado estable en 0.5 mg/L como lo indica la norma mexicana para la descarga de cromo hexavalente (Figura 2b).

Los resultados muestran un tiempo de residencia τ_1 de 53.59 min y una tasa de remoción R_1 de 96.4 % para la UT_1 y un tiempo de residencia τ_2 de 52.08 min y una tasa de remoción R_2 de 98.1 % en la UT_2 . Los resultados presentados son comparables con las tasas de remoción presentadas en trabajos previos, en donde se presentan variaciones de 60 a 99.9 % de acuerdo a la velocidad de flujo en el reactor, con tiempos de residencia desde 15 min hasta 2 horas (Barrera *et al.* 2003; Kabdaslı *et al.*, 2023).

Finalmente, en la Figura 3 se presenta la topología de diseño de acuerdo con la superestructura de la Figura 1 en donde se presentan todas las interconexiones y sus respectivas cantidades de flujo y concentración del sistema de tratamiento.

Tabla 2. Resultados del modelo matemático de programación dinámica

Variable (unidades)	Cota inferior	Valor	Cota superior
$f_{1,1}$ (L/min)	0	2.322	3
$f_{1,2}$ (L/min)	0	0.678	3
$f_{1,e}$ (L/min)	0	0	3
$f_{2,1}$ (L/min)	0	5	5
$f_{2,2}$ (L/min)	0	0	5
$f_{2,e}$ (L/min)	0	0	5
$f_{3,1}$ (L/min)	0	7	7
$f_{3,2}$ (L/min)	0	0	7
$f_{3,e}$ (L/min)	0	0	7
$f_{4,1}$ (L/min)	0	9	9
$f_{4,2}$ (L/min)	0	0	9
$f_{4,e}$ (L/min)	0	0	9
Q_1 (L/min)	0	23.322	24
Q_2 (L/min)	0	24	24
cin_1 (mg/L)	0	501.357	570
cin_2 (mg/L)	0	27.322	570
$cout_1$ (mg/L)	0	17.945	570
$cout_2$ (mg/L)	0	0.5	570
$G_{1,1}$ (L/min)	0	0	24
$G_{1,2}$ (L/min)	0	23.322	24
$G_{2,1}$ (L/min)	0	0	24
$G_{2,2}$ (L/min)	0	0	24
$G_{1,e}$ (L/min)	0	0	24
$G_{2,e}$ (L/min)	0	24	24
$C_{j,e}$ (mg/L)	0	0.5	0.5
V_1 (L)	0	1250	1250
I_1 (A/m ²)	0	350	350
V_2 (L)	0	1250	1250
I_2 (A/m ²)	0	350	350

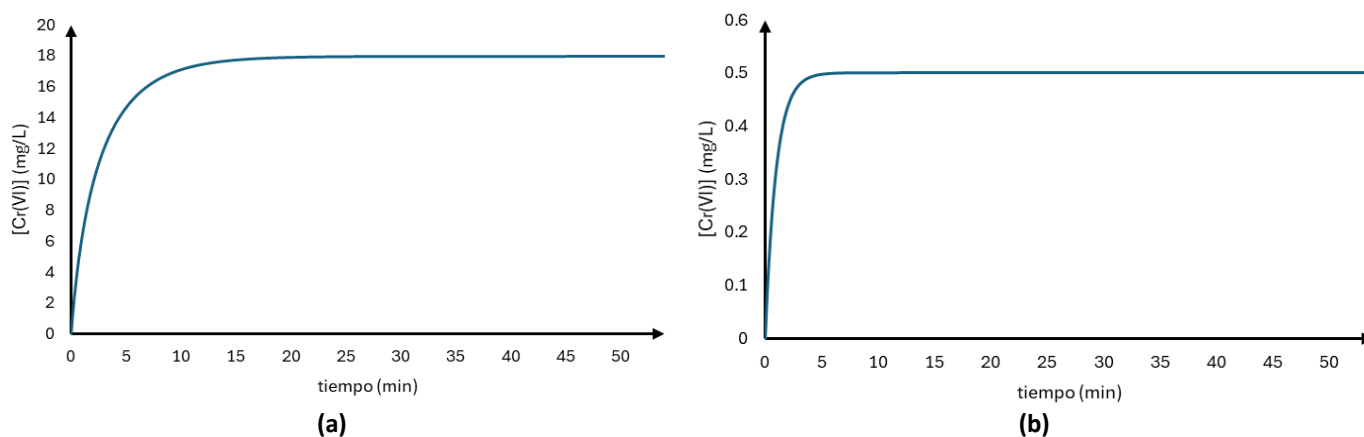


Figura 2. Cambio de la concentración de cromo hexavalente con respecto al tiempo según el modelo de la Ecuación 1: (a) Perfil de concentración en la unidad de tratamiento uno y (b) Perfil de concentración en la unidad de tratamiento dos

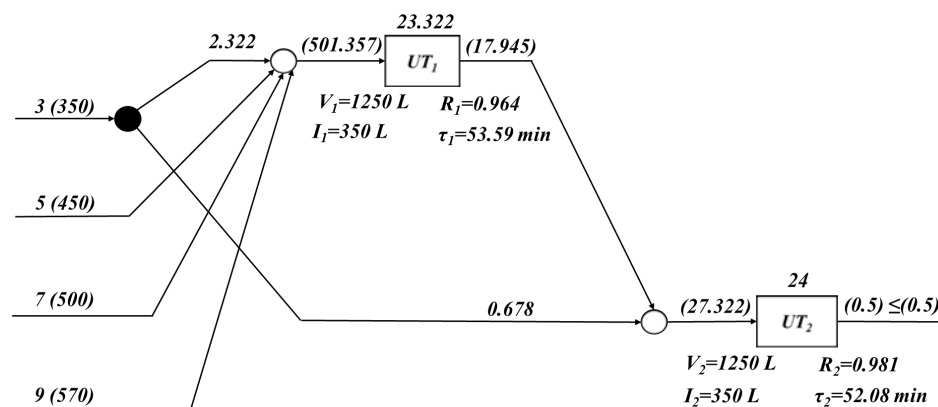


Figura 3. Topología de diseño final del sistema de tratamiento de efluentes contaminados con cromo hexavalente

Conclusiones

Los resultados de este trabajo muestran que es posible obtener un diseño óptimo mediante programación dinámica de un sistema de tratamiento de conjuntos de corrientes efluentes. El esquema de optimización permite dar cumplimiento a la norma ambiental para la descarga de cromo hexavalente a los cuerpos receptores como un alcantarillado municipal, suponiendo que el costo de tratamiento es proporcional al flujo alimentado en cada reactor electroquímico. Por otra parte, es posible implementar ecuaciones diferenciales que representan un modelo de balance de materia en estado transitorio y con reacción química, lo cual permite usar tasas de remoción variables, en contraste con los trabajos previos, donde típicamente se usan tasas de remoción constantes a partir de balances de masa en estado estacionario.

Agradecimientos y financiamiento: ALY (No. CVU: 502742) agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico mediante el estímulo del Sistema Nacional de Investigadoras e investigadores (SNII).

Bibliografía

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2012). *Toxicological profile for chromium*. U.S. Department of Health and Human Services.
- Barrera-Díaz, C., Palomar-Pardavé, M., Romero-Romo, M., & Martínez, S. (2003). Chemical and electrochemical considerations on the removal process of hexavalent chromium from aqueous media. *Journal of Applied Electrochemistry*, 33, 61–71. <https://doi.org/10.1023/A:1022983919644>
- El-Halwagi, M. M. (2017). *Sustainable design through process integration: Fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement*. Butterworth-Heinemann.
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Golder, A. K., Samanta, A. N., & Ray, S. (2007). Removal of Cr(VI) from aqueous solutions using electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.021>
- Grossmann, I. E., & Guillén-Gosálbez, G. (2010). Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. *Computers & Chemical Engineering*, 34(9), 1365–1376. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.012>
- Kabdaslı, I., & Tünay, O. (2023). Hexavalent chromium removal from water and wastewaters by electrochemical processes: Review. *Molecules*, 28, 2411. <https://doi.org/10.3390/molecules28052411>
- Kimbrough, D. E., Cohen, Y., Winer, A. M., Creelman, L., & Mabuni, C. (1999). A critical assessment of chromium in the environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29(1), 1–46. <https://doi.org/10.1080/10643389991259164>
- Martínez-Huitile, C. A., & Brillas, E. (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 87(3–4), 105–145. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.09.017>
- NOM-001-SEMARNAT-2021. (2022). *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Owlad, M., Aroua, M. K., Daud, W. A. W., & Baroutian, S. (2009). Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 200(1–4), 59–77. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9893-7>
- Rodríguez, M. G., Mendoza, V., Puebla, H., & Martínez, S. A. (2008). Removal of Cr(VI) from wastewaters at semi-industrial electrochemical reactors with rotating ring electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2–3), 1221–1229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.114>
- Sharma, Y. C., Srivastava, V., & Singh, V. K. (2019). Electrochemical treatment technologies for wastewater containing heavy metals: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100107>
- World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. WHO.

Desempeño de un motor diésel que opera con mezclas biodiésel-diésel de aceite residual y de *Jatropha curcas*

Guillermo Benítez Olivares ¹, Alejandro Torres Aldaco ^{1,*}, Raúl Lugo Leyte ¹, Helen Denise Lugo Méndez ², Sergio Castro Hernández ¹, Ladislao Eduardo Méndez Cruz ³

¹ Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco No. 186, Colonia Leyes de Reforma 1ª Sección, 09310, Alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México, México.

² Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa, Av. Vasco de Quiroga No. 4871, Colonia Santa Fé Cuajimalpa, 05348, Cuajimalpa, Ciudad de México, México.

³ División de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial, Tecnológico Nacional de México/TES de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Col. Valle de Anáhuac, Ecatepec de Morelos 55210, México.

* Autor de correspondencia: ata@xanum.uam.mx

Energías Renovables (Biocombustibles)

Recibido: 20 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 14 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.533>

Resumen: El uso de biodiésel representa una alternativa sostenible al diésel convencional, al contribuir significativamente a la reducción de emisiones contaminantes como dióxido de carbono, compuestos de azufre, hidrocarburos aromáticos y partículas sólidas. En este estudio se evaluó el desempeño de un motor diésel operando con mezclas de biodiésel obtenido a partir de aceite de *Jatropha curcas* y aceite comestible residual. La síntesis del biodiésel se realizó mediante un proceso de transesterificación, utilizando hidróxido de sodio como catalizador y una relación molar metanol:aceite de 6:1, en un reactor tipo batch. Se prepararon dos mezclas: B10 (90 % diésel 10 % biodiésel) y B20 (80 % diésel 20 % biodiésel). Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un motor diésel TQ-Plint "Merlín 2", monocilíndrico, de cuatro tiempos y enfriado por aire, acoplado a un dinamómetro. Se analizaron parámetros clave para evaluar el desempeño del motor: potencia generada, torque, eficiencia térmica y consumo específico de combustible. Además, se realizó un análisis paramétrico de estas variables en función de la velocidad de giro del motor, dentro del rango de 1,500 a 1,900 rpm. Los resultados evidencian que la mayor potencia generada se obtuvo con diésel puro, alcanzando 330 W a una velocidad de 2,300 rpm. Sin embargo, las mezclas B10 y B20 presentan un comportamiento competitivo, lo que sugiere su viabilidad como combustibles alternativos en motores diésel convencionales.

Palabras clave: biodiésel, *Jatropha curcas*, aceite residual, motor diésel, eficiencia térmica, mezclas B10 y B20

Performance of a diesel engine operating with biodiesel-diesel blends from waste oil and *Jatropha curcas*

Abstract: The use of biodiesel represents a sustainable alternative to conventional diesel, significantly contributing to the reduction of pollutant emissions such as carbon dioxide, sulfur compounds, aromatic hydrocarbons, and particulate matter. In this study, the performance of a diesel engine operating with biodiesel blends derived from *Jatropha curcas* oil and waste cooking oil was evaluated. The biodiesel was synthesized through a transesterification process, using sodium hydroxide as a catalyst and a methanol-to-oil molar ratio of 6:1, in a batch-type reactor. Two blends were prepared: B10 (90% diesel, 10% biodiesel) and B20 (80% diesel, 20% biodiesel). Experimental tests were carried out on a TQ-Plint "Merlin 2" diesel engine, a single-cylinder, four-stroke, air-cooled engine coupled to a dynamometer. Key parameters were analyzed to assess engine performance: power output, torque, thermal efficiency, and specific fuel consumption. Additionally, a parametric analysis of these variables was conducted as a function of engine speed, ranging from 1,500 to 1,900 rpm. The results show that the highest power output was achieved with pure diesel, reaching 330 W at a speed of 2,300 rpm. However, the B10 and B20 blends demonstrated competitive performance, suggesting their feasibility as alternative fuels in conventional diesel engines.

Keywords: biodiesel, *Jatropha curcas*, waste oil, diesel engine, thermal efficiency, B10 and B20 blends

Introducción

La creciente preocupación por la disminución de las reservas de petróleo, así como por los impactos ambientales asociados a la combustión de combustibles fósiles, ha impulsado la búsqueda de fuentes energéticas sostenibles. En este contexto, los biocombustibles y en particular el biodiésel, han cobrado una relevancia creciente como alternativa viable para reducir la dependencia del diésel convencional y mitigar las emisiones contaminantes. De acuerdo con datos de Petróleos Mexicanos (PEMEX), el consumo nacional de diésel asciende a aproximadamente 180 mil barriles diarios,

mientras que, a nivel internacional, se estima que la producción de biodiésel alcanza los 259 mil barriles diarios según *The Economist*. Este panorama justifica el interés por evaluar el desempeño de motores que operan con mezclas biodiésel-diésel, especialmente a partir de fuentes no comestibles y residuales como el aceite usado de cocina y el aceite de *Jatropha curcas*. Este biocombustible se obtiene a través de la transesterificación de triglicéridos de origen vegetal o animal con un alcohol, lo que resulta en ésteres monoalquilos de ácidos grasos de cadena larga. El biodiésel es un combustible renovable, no tóxico y biodegradable, con propiedades similares al diésel convencional utilizado en automotores. Puede ser mezclado con diésel en diversas proporciones, como B5, B10, B20, entre otras, sin requerir modificaciones sustanciales en los motores (Selvan *et al.*, 2022). Una de las principales ventajas del biodiésel con respecto al diésel convencional es su propiedad lubricante, que ayuda a prolongar la vida útil del motor. Además, el biodiésel es menos inflamable, posee un número de cetano superior en un 50%, tiene un mayor punto de ignición y presenta una mayor lubricidad. A diferencia del diésel derivado del petróleo, el biodiésel no contribuye al aumento de los niveles atmosféricos de CO₂ durante su combustión, esto lo convierte en una opción más ecológica (Palani *et al.*, 2022; Farouk *et al.*, 2024). En términos ambientales, el biodiésel representa una alternativa más limpia y renovable al diésel convencional. Se ha estimado que, el uso de una tonelada de biodiésel puede evitar la emisión de 2.5 toneladas de CO₂, además de eliminar las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), lo que reduce considerablemente la formación de lluvias ácidas (Solaymani, 2023). Además, su uso en motores de combustión interna ha demostrado ser eficaz en la reducción de emisiones de hollín y otros contaminantes (Riojas-González *et al.*, 2024). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, el biodiésel presenta algunos desafíos. En particular, el uso de biodiésel puede incrementar las emisiones de NO_x y afectar el desempeño del motor, como la potencia, el torque, el consumo específico de combustible y la corrosión en el sistema de combustión. Las mezclas de biodiésel-diésel, comúnmente utilizadas en proporciones como B10 (10% biodiésel y 90% diésel) o B20 (20% biodiésel y 80% diésel), se han convertido en una opción frecuente para evaluar el impacto de este biocombustible en motores de combustión interna (Arya *et al.*, 2022; Xue, 2013).

El motor de combustión interna convierte la energía química del combustible en energía mecánica. A través del proceso de combustión, el combustible se oxida dentro del motor, liberando calor a presión constante, como consecuencia se incrementa su temperatura, posteriormente se expande provocando el movimiento del pistón y produciendo trabajo (Atadashi *et al.*, 2010). La eficiencia y las emisiones de estos motores dependen de varios factores, como la relación aire-combustible, la mezcla de combustible utilizada y las velocidades de giro (rpm). En los motores diésel, la relación de compresión es considerablemente mayor que en los motores a gasolina, lo que mejora la eficiencia térmica, pero también genera desafíos en términos de emisiones de NO_x (Roy *et al.*, 2014). El comportamiento de los motores de combustión interna también está influenciado por las características del combustible.

El desempeño del motor varía en función de las propiedades del combustible, las velocidades de giro y otros parámetros operativos. La ignición del combustible en un motor diésel depende de la temperatura generada por la compresión del aire, lo que influye directamente en la eficiencia de la combustión (Selvan *et al.*, 2022). A pesar de que el biodiésel ofrece ventajas en términos de reducción de emisiones de CO₂ y SO_x, su impacto en el desempeño del motor y las emisiones de NO_x debe ser evaluado cuidadosamente. Por otro lado, las pérdidas mecánicas en un motor de combustión interna, que provienen principalmente de la fricción entre los pistones y las paredes del cilindro, afectan la eficiencia global del motor. Estas pérdidas también están relacionadas con la potencia requerida para la inyección de combustible, lo cual influye en el desempeño general del sistema (Kheiralipour *et al.*, 2024). Este estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de un motor diésel utilizando mezclas de biodiésel derivado de aceites residuales y aceite de *Jatropha curcas*. A través de este análisis, se pretende determinar el impacto de diferentes proporciones de biodiésel en el desempeño del motor, las emisiones y la eficiencia térmica, así como las ventajas y limitaciones de usar biodiésel como sustituto del diésel convencional.

Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo utilizando diésel comercial y mezclas de biodiésel-diésel, las cuales fueron elaboradas con biodiésel producido previamente mediante transesterificación a partir de aceite residual de cocina y aceite de *Jatropha curcas*. El biodiésel obtenido cumple con la norma ASTM D6751, con una viscosidad de 4.1 mm²/s, una densidad de 880 kg/m³ y un contenido de ésteres metílicos (FAME) del 96.5%. Además, se determinó su poder calorífico inferior, obteniéndose un valor promedio de 38,936 kJ/kg. A partir de este biodiésel, se prepararon dos mezclas con diferentes concentraciones: B10 (10% biodiésel y 90% diésel) y B20 (20% biodiésel y 80% diésel). Estas

mezclas fueron evaluadas para analizar el desempeño de un motor diésel en condiciones controladas. El motor utilizado en el estudio fue un TQ-Plint "Merlín 2" (Figura 1), modelo monocilíndrico de cuatro tiempos, enfriado por aire. Este motor estuvo acoplado a un dinamómetro para medir su desempeño. Las especificaciones técnicas del motor son las siguientes:

- Velocidad de giro máxima: 2,400 rpm
- Potencia generada: 1.5 kW
- Relación de compresión: 19:1
- Volumen desplazado: 0.28 litros
- Diámetro del cilindro: 73 mm
- Carrera: 67 mm

El motor operó dentro de un rango de temperatura ambiente que varió entre 20 °C y 35 °C y una humedad relativa que osciló entre 30% y 95%. El ciclo termodinámico del motor se describe mediante cuatro procesos fundamentales:



Figura 1. Motor diésel acoplado a un dinamómetro.

Compresión isentrópica: El proceso de compresión es desde 0.78 bar a 48.12 bar (proceso 1-2). **Suministro de calor a presión constante:** El calor se suministra al motor manteniendo una presión constante durante el proceso 2-3. **Expansión isentrópica:** En este proceso, la presión cae de 48.12 bar a 2.05 bar (proceso 3-4). **Rechazo de calor a volumen constante:** Finalmente, el calor se rechaza a volumen constante (proceso 4-1). Los procesos termodinámicos descritos se ilustran en los diagramas temperatura-entropía (Figura 2a) y presión-volumen (Figura 2b). Las pruebas se realizaron operando el motor a diversas velocidades de giro y evaluando los parámetros de desempeño, como la potencia generada, el consumo de combustible y las emisiones, con cada mezcla de biodiésel estudiada y diésel comercial. Durante los ensayos, se monitorearon las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad, para asegurar que las pruebas se realizaban dentro del rango óptimo de operación del motor.

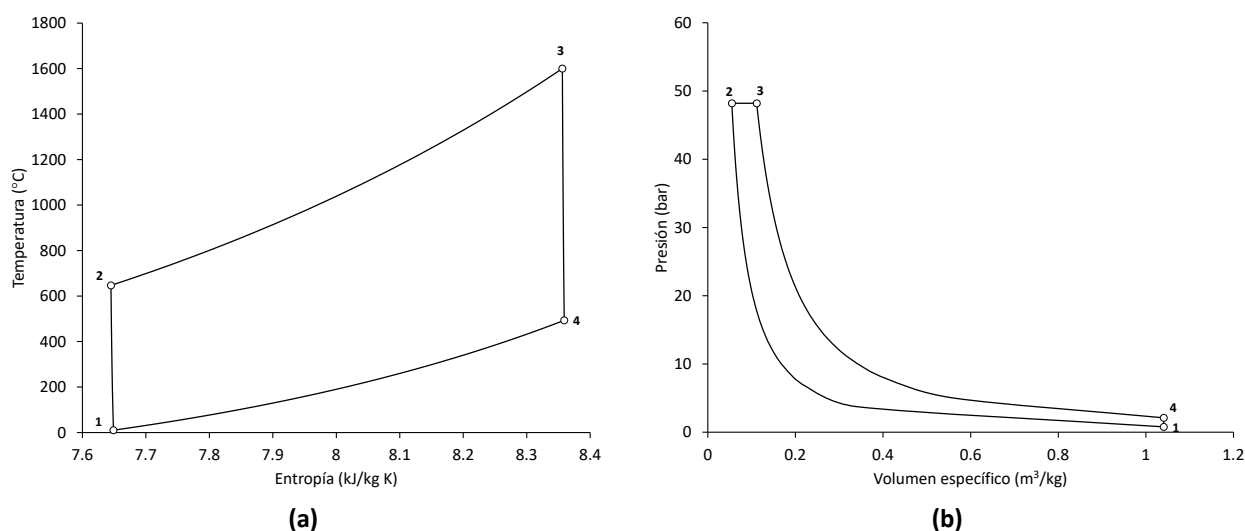


Figura 2. Diagrama Temperatura – Entropía y Presión – Volumen específico del ciclo diésel

Las pruebas en el motor iniciaron a una velocidad de giro de 1,500 rpm en el dinamómetro, la velocidad de giro se fue incrementado en 100 rpm, en cada prueba, se monitoreó, el comportamiento del torque y el consumo de combustible. Las mediciones se realizaron en la alcaldía Iztapalapa de la Ciudad de México. Las condiciones ambientales durante las pruebas fueron: temperatura ambiente 20°C, velocidad del viento 13 km/h y humedad relativa del 39%. Los parámetros obtenidos en el desempeño del motor son: la potencia generada, la eficiencia térmica y el consumo específico de

combustible, para las mezclas de biodiésel, así como para el diésel, se realizó un análisis paramétrico, en función de la velocidad de giro del motor en un rango de operación de 1,500 rpm a 1,900 rpm. Si bien en este estudio no se realizó un análisis estadístico formal como ANOVA o pruebas post hoc (por ejemplo, Tukey), se reconoce su utilidad y se contempla su aplicación en futuros trabajos para fortalecer la comparación entre combustibles.

Resultados y Discusión

Las Figuras 2a y 2b muestran los estados termodinámicos del motor diésel utilizado en las pruebas con las mezclas biodiésel-diésel. El diagrama T-s (temperatura-entropía) revela que la temperatura en la cámara a la salida de la combustión alcanzó los 1,600 °C (T_3), mientras que la temperatura de los gases de escape fue de 400 °C (T_4). Se consideró un ciclo ideal, con procesos de compresión y expansión isoentrópicos (1–2) y (3–4). La Figura 2b presenta el diagrama P-v (presión-volumen específico) para el motor, con una relación de compresión de 19:1. A partir de este diagrama, se obtuvo una presión P_2 de 48.12 bar. Se asumió un volumen muerto de 0.1 litros y una relación de corte de 2.0, que son representaciones estándar para este tipo de motor.

Cabe destacar que las altas temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión, especialmente en condiciones de operación con mezclas B20, pueden favorecer la formación de óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos altamente contaminantes que contribuyen al smog fotoquímico y a problemas respiratorios. Esta posible desventaja ambiental del biodiésel, asociada al incremento térmico, no fue cuantificada en el presente estudio, pero constituye una línea de investigación relevante. En trabajos futuros será fundamental incluir mediciones de emisiones para evaluar de manera más completa el impacto ambiental del uso de biodiésel como combustible alternativo.

La Figura 3 ilustra el comportamiento del flujo másico de combustible en función de la velocidad de giro del motor para las mezclas biodiésel-diésel y diésel puro. El flujo fue medido utilizando un caudalímetro digital integrado al banco de pruebas, lo cual permitió obtener lecturas continuas y precisas. Se observa que, al incrementar la velocidad de giro del motor, también aumenta el flujo másico de combustible, lo que se traduce en un mayor consumo. En el intervalo de operación entre 1,400 rpm y 2,400 rpm, inicialmente considerado, se observó que el motor presentaba un comportamiento inestable fuera del rango comprendido entre 1,500 rpm y 1,900 rpm, por lo cual el análisis se centró en este último. En este rango, el diésel presentó un comportamiento lineal en el consumo de combustible, pasando de 0.072 kg/h a 0.118 kg/h, lo que representa un aumento aproximado del 63.6%. En comparación, la mezcla B20 Residual mostró un consumo de 0.108 kg/h a 1,500 rpm, y a la velocidad máxima de 1,900 rpm, el consumo alcanzó 0.144 kg/h, lo que representa un incremento del 33% en el flujo de combustible. La mezcla B10 Residual presentó un comportamiento similar, con un consumo de 0.108 kg/h a 1,500 rpm y de 0.144 kg/h a 1,900 rpm. En el caso de la mezcla B20 *Jatropha*, el flujo de combustible fue de 0.100 kg/h a 1,500 rpm y aumentó a 0.136 kg/h a 1,900 rpm, lo que indica un incremento del 36.36%. Por su parte, la mezcla B10 *Jatropha curcas* mostró un consumo de combustible de 0.0936 kg/h a 1,500 rpm, el cual aumentó progresivamente conforme se incrementó la velocidad de giro del motor.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la potencia generada por el motor diésel al utilizar distintas mezclas de biodiésel-diésel (B10 Residual, B10 *Jatropha curcas*, B20 Residual, B20 *Jatropha curcas*) y diésel puro, en función de la velocidad de giro del motor. A bajas velocidades de giro, se observaron diferencias significativas en el desempeño de los combustibles. La mezcla B10 *Jatropha curcas*, a 900 rpm, produjo una potencia de 75 W. Por su parte, la mezcla B20 *Jatropha curcas*, a 1,100 rpm, también alcanzó 75 W. La mezcla B10 Residual, a 1,400 rpm, generó una potencia de 90 W, mientras que el diésel, a 1,200 rpm, generó igualmente 75 W. Estos resultados indican que las mezclas de biodiésel, especialmente las que provienen de *Jatropha curcas*, tuvieron un comportamiento similar a bajas velocidades de giro, con variaciones menores en la potencia generada. En el intervalo de 1,400 rpm a 2,000 rpm, todos los combustibles estudiados presentaron un comportamiento similar, con una variación en la potencia generada de no más del 10%, alcanzando una potencia máxima de entre 280 W y 300 W. Este comportamiento es indicativo de que, en este rango de velocidad, el desempeño de las mezclas biodiésel-diésel y del diésel puro es comparable. Sin embargo, el diésel puro, debido a su mayor velocidad máxima de giro de 2,300 rpm, logró generar una potencia máxima de 350 W, superando a las mezclas biodiésel-diésel.

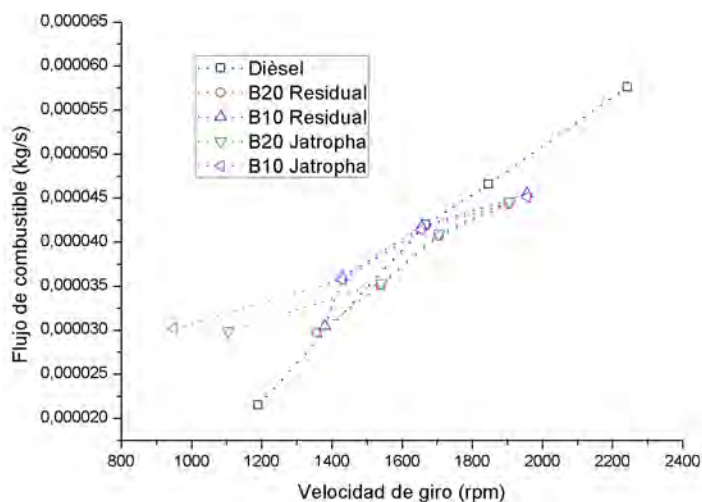


Figura 3. Flujo de combustible en función de la velocidad de giro, para las mezclas biodiésel-diésel y diésel

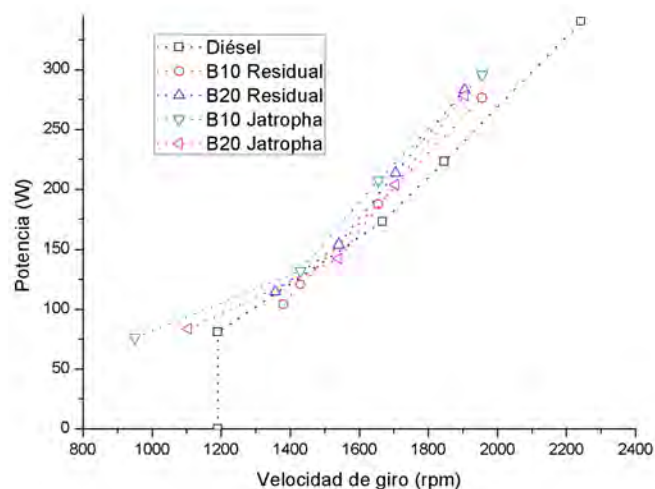


Figura 4. Potencia generada en función de la velocidad de giro, para las mezclas biodiésel-diésel y diésel

La Figura 5 muestra a la eficiencia térmica para cada combustible a las distintas velocidades de giro. A 900 rpm, la mezcla B10 *Jatropha curcas* presentó una eficiencia térmica de 6%, y para las otras mezclas B20 alcanzó una eficiencia de 6.5% a 1,100 rpm. En comparación, la mezcla B20 Residual, a la misma velocidad, mostró una eficiencia térmica de 10%, y el diésel puro alcanzó 8% a 1,200 rpm. Estos resultados reflejan que las mezclas con aceite residual (B20 Residual) tuvieron una mayor eficiencia térmica que las mezclas con aceite de *Jatropha curcas*, así como el diésel, a bajas velocidades de giro. Al incrementar la velocidad de giro a 1,400 rpm, la mezcla B10 Residual destacó significativamente, alcanzando una eficiencia térmica de 22%, lo que contrasta notablemente con las otras mezclas biodiésel-diésel y el diésel, cuyas eficiencias térmicas no superaron el 8%. Este aumento en la eficiencia térmica podría estar relacionado con el comportamiento de la mezcla, que presentó una mayor densidad energética y mejor combustión en comparación con las otras mezclas.

A 2,000 rpm, la eficiencia térmica de la mezcla B10 Residual alcanzó 28%, y para las otras mezclas, su eficiencia térmica se mantuvo en 15%, y el diésel se alcanzó una eficiencia térmica de 10%. Este comportamiento sugiere que la mezcla B10 Residual es mejor en términos de aprovechamiento del calor generado, este resultado la posiciona como la mezcla más destacada entre las muestras estudiadas. Incluso a la máxima velocidad de giro de 2,300 rpm, el diésel presentó una eficiencia térmica máxima de solo 13%, inferior a la obtenida con la mezcla B10 Residual en todo el intervalo de velocidades evaluadas. Los resultados indican que, todas las mezclas de biodiésel-diésel presentaron un desempeño competitivo respecto a los resultados del diésel puro en términos de la potencia generada, la mezcla B10 Residual destaca en la eficiencia térmica, esto sugiere que dicha mezcla podría ser una opción más eficiente y sostenible para motores diésel en aplicaciones donde la eficiencia energética sea un factor clave.

La Figura 6 presenta las eficiencias volumétricas alcanzadas por las distintas mezclas de biodiésel-diésel y diésel puro en función de la velocidad de giro del motor. A 900 rpm, la mezcla B10 *Jatropha curcas* alcanzó una eficiencia volumétrica del 34%, lo que indica un buen aprovechamiento del volumen de combustible en ese rango de velocidades de giro. En comparación, la mezcla B20 Residual a 1,100 rpm mostró una eficiencia volumétrica de 25%, mientras que la mezcla B20 *Jatropha curcas* presentó una eficiencia de 27% en el mismo intervalo de velocidad de giro.

La mezcla B10 Residual, a 1,400 rpm, su eficiencia volumétrica fue de 20%, que representa una disminución en comparación con las mezclas de *Jatropha curcas*. A 1,200 rpm, el diésel alcanzó una eficiencia volumétrica de 45%, sobresaliendo notablemente respecto a las mezclas biodiésel-diésel en esta velocidad. Este comportamiento indica que, en bajas revoluciones, el diésel tiene una ventaja en términos de eficiencia volumétrica, lo que puede deberse a una combustión más eficiente y una mayor densidad energética. Al incrementar la velocidad de giro a 2,000 rpm, todas las mezclas de biodiésel-diésel presentaron eficiencias volumétricas entre 28% y 30%, esto sugiere una estabilización del desempeño volumétrico en este rango de velocidades.

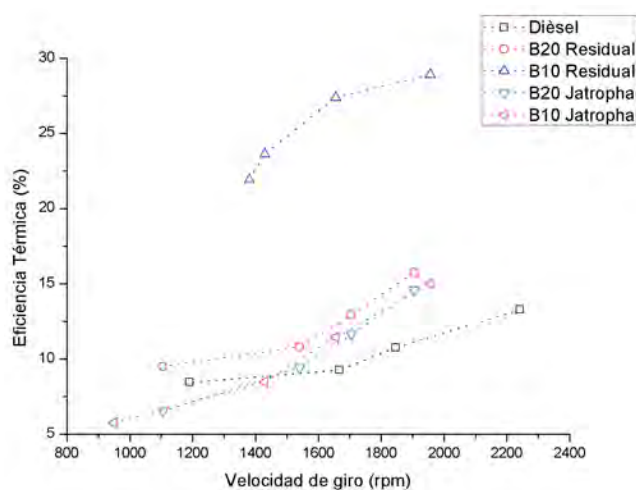


Figura 5. Eficiencia térmica en función de la velocidad de giro, para las mezclas de biodiésel-diésel y diésel

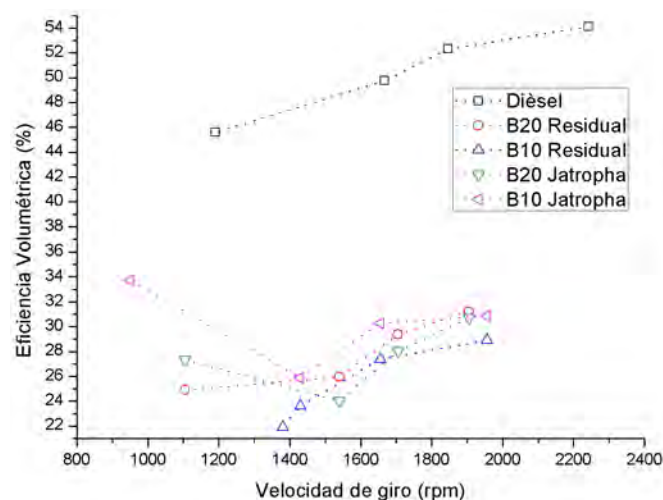


Figura 6. Eficiencia volumétrica en función de la velocidad de giro, para todas las mezclas biodiésel, diésel y diésel

En cambio, el diésel, a 2,300 rpm, alcanzó una eficiencia volumétrica de 45%, manteniendo su superioridad en cuanto al aprovechamiento del volumen de combustible. En términos generales, el diésel presentó una eficiencia volumétrica 50% mayor en todas las velocidades de giro estudiadas, en comparación con las mezclas biodiésel-diésel. Este resultado refuerza la idea que, las mezclas de biodiésel pueden ofrecer un desempeño competitivo en cuanto a potencia y eficiencia térmica, el diésel sigue siendo más eficiente en términos volumétricos, especialmente en rangos de velocidad más altos. Este comportamiento podría estar relacionado con las características propias de las mezclas de biodiésel, por su menor densidad energética y el comportamiento de la combustión que no siempre es óptimo en el aprovechamiento del volumen del combustible.

La Figura 7 muestra el flujo de calor suministrado al motor diésel por las mezclas biodiésel-diésel y el diésel, en función de la velocidad de giro, cuando se incrementa la velocidad de giro del motor, el flujo de calor se incrementa proporcionalmente en todos los casos. El diésel a 2,400 rpm provoca que ingrese mayor flujo de calor al motor de 2.6 kW, esto es debido al mayor poder calorífico del diésel, mientras que las mezclas biodiésel-diésel a 2,000 rpm el flujo de calor suministrado al motor está en el intervalo de 1.8 a 1.9 kW. La mezcla B10 *Jatropha curcas* a 900 rpm proporcionó el mayor flujo de calor al motor, esto se debe a que la mezcla tiene un punto de ignición menor, debido a esto puede operar a una velocidad de giro menor que las otras mezclas y el diésel.

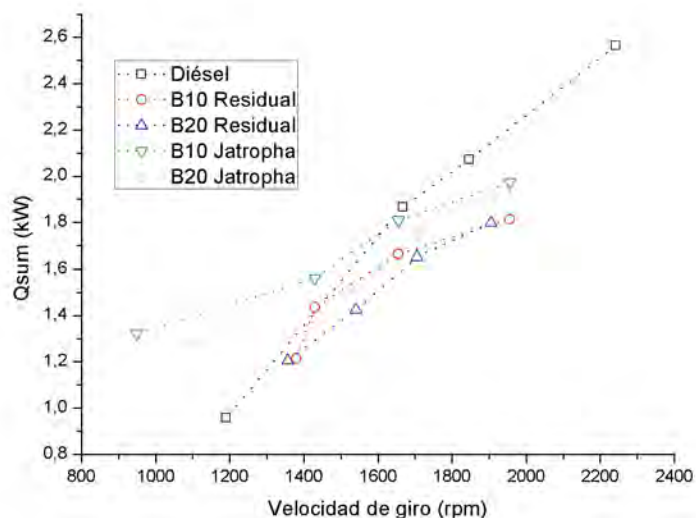


Figura 7. Flujo de calor suministrado al motor en función de la velocidad de giro, para todas las mezclas estudiadas biodiésel-diésel y diésel

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio indican que, las mezclas biodiésel-diésel pueden emplearse de manera eficiente en motores diésel convencionales, sin requerir ajustes significativos en su operación, particularmente dentro del intervalo de 1,500 a 1,900 rpm. En este rango, el desempeño del motor en términos de potencia generada, eficiencia térmica y consumo de combustible fue comparable al del diésel convencional. El comportamiento operativo fue similar entre las mezclas elaboradas con biodiésel a partir de aceite residual y aquellas con aceite de *Jatropha curcas*, lo cual sugiere que la fuente del biocombustible no introduce diferencias significativas en el funcionamiento del motor. Esto refuerza la viabilidad de utilizar materias primas locales o de desecho como insumos para la producción de biodiésel, con beneficios tanto económicos como ambientales. Desde un punto de vista práctico, estas mezclas representan una alternativa técnica viable en aplicaciones de media carga y condiciones de operación estables, como en maquinaria agrícola, transporte público urbano o sistemas estacionarios. En condiciones de alta exigencia térmica o elevada demanda de carga, puede ser más adecuado el uso de diésel puro. El uso de biodiésel podría contribuir a la reducción de emisiones contaminantes y a la disminución en la dependencia de combustibles fósiles. Sin embargo, este estudio presenta algunas limitaciones importantes: las pruebas se realizaron en un solo tipo de motor y no se contemplaron mediciones de emisiones como óxidos de nitrógeno (NOx) o material particulado (PM), las cuales son fundamentales para una evaluación ambiental completa. Como líneas futuras de investigación, se recomienda ampliar el estudio a distintos tipos de motores y condiciones de operación, así como realizar pruebas de larga duración que incluyan el análisis de emisiones, desgaste de componentes y estabilidad de desempeño a lo largo del tiempo. Esto permitirá validar con mayor solidez el uso de mezclas biodiésel-diésel en escenarios industriales.

Bibliografía

- Arya, M., Rout, A. K., & Samanta, S. (2022). A review on the effect of engine performance and emission characteristics of C.I. engine using diesel–biodiesel–additives fuel blend. *Materials Today: Proceedings*, 51(Part 8), 2224–2232. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.359>
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., & Abdul Aziz, A. (2010). High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1999–2008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.020>
- Farouk, S. M., Tayeb, A. M., Abdel-Hamid, S. M. S., & Osman, R. M. (2024). Recent advances in transesterification for sustainable biodiesel production, challenges, and prospects: A comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 12722–12747. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32027-4>
- Kheiralipour, K., Khoobakht, M., & Karimi, M. (2024). Effect of biodiesel on environmental impacts of diesel mechanical power generation by life cycle assessment. *Energy*, 289, 129948. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129948>
- Palani, Y., Devarajan, C., Manickam, D., & Thanikodi, S. (2022). Performance and emission characteristics of biodiesel-blend in diesel engine: A review. *Environmental Engineering Research*, 27(1). <https://doi.org/10.4491/eer.2020.338>
- Riojas-González, H. H., Reta Heredia, I., Bortoni Anzures, L. J., & Martínez Torres, J. J. (2024). Desempeño en el motor diésel con la aplicación del biodiésel. *Ingeniería y Desarrollo*, 42(1), 1. <https://doi.org/10.14482/inde.42.01.791.582>
- Roy, M. M., Wang, W., & Alawi, M. (2014). Performance and emissions of a diesel engine fueled by biodiesel–diesel, biodiesel–diesel-additive and kerosene–biodiesel blends. *Energy Conversion and Management*, 84, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.033>
- Selvan, B. K., Das, S., Chandrasekar, M., Girija, R., John Vennison, S., Jaya, N., Saravanan, P., Rajasimman, M., Vasseghian, Y., & Rajamohan, N. (2022). Utilization of biodiesel blended fuel in a diesel engine – Combustion engine performance and emission characteristics study. *Fuel*, 311, 122621. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122621>
- Solaymani, S. (2023). Biodiesel and its potential to mitigate transport-related CO₂ emissions. *Carbon Research*, 2, 38. <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00067-z>
- Xue, J. (2013). Combustion characteristics, engine performances and emissions of waste edible oil biodiesel in diesel engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 350–365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.039>

Humedales construidos con plantas ornamentales para la eliminación de metales pesados en aguas residuales: una revisión sistemática

Jazmín Alejandra Segovia Cano *, Luis Carlos Sandoval-Herazo

Laboratorio de Humedales y Sostenibilidad Ambiental, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: ale.segoviacano@gmail.com; Tel.: 2281717852

Desarrollo Sustentable (Humedales naturales y construidos)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 15 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.623>

Resumen: Los metales pesados en aguas residuales representan una amenaza crítica para la salud pública y los ecosistemas acuáticos debido a su toxicidad, persistencia y bioacumulación. En los últimos años, los humedales construidos (HC) con plantas ornamentales han emergido como una alternativa sostenible y estéticamente atractiva para su eliminación. Esta revisión sistemática analiza estudios publicados entre 2020 y 2025 sobre la capacidad de remoción de metales pesados (Cd, Pb, Zn, Cr, Ni, Cu, Hg) mediante HC que emplean especies ornamentales. La búsqueda de información se realizó en bases de datos (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI) seleccionando estudios con criterios de inclusión relacionados con el tipo de metal, configuración del humedal y parámetros operativos. Los resultados muestran que especies como *Canna indica*, *Heliconia psittacorum*, *Chrysopogon zizanioides* e *Iris ssp.* alcanzan eficiencias superiores al 80% para Cd, Zn y Pb en condiciones controladas, destacándose la influencia del diseño del humedal (flujo vertical, subsuperficial, islas flotantes) y del tiempo de retención hidráulica en el desempeño. Además, el uso de especies ornamentales añade beneficios paisajísticos, sociales y económicos, favoreciendo su implementación en contextos urbanos y turísticos. Sin embargo, se identificaron vacíos de investigación, incluyendo la falta de estudios a escala real, la ausencia de estandarización en el reporte de datos y la gestión segura de la biomasa contaminada. En conclusión, los HC con plantas ornamentales constituyen una tecnología prometedora y multifuncional para el tratamiento de aguas residuales con metales pesados, aunque su consolidación requerirá investigación aplicada, optimización de diseño y políticas de apoyo que impulsen su adopción a gran escala.

Palabras clave: Fitorremediación; metales pesados; plantas ornamentales; aguas residuales; humedales construidos

Evaluation of heavy metal removal capacity in wastewater using constructed wetlands with ornamental plants: a systematic review

Abstrac: Heavy metals in wastewater pose a critical threat to public health and aquatic ecosystems due to their toxicity, persistence, and bioaccumulation. In recent years, constructed wetlands (CW) with ornamental plants have emerged as a sustainable and aesthetically appealing alternative for their disposal. This systematic review analyzes studies published between 2020 and 2025 on the removal capacity of heavy metals (Cd, Pb, Zn, Cr, Ni, Cu, Hg) by CWs using ornamental species. The information search was conducted in databases (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI) selecting studies with inclusion criteria related to the type of metal, wetland configuration and operational parameters. The results show that species such as *Canna indica*, *Heliconia psittacorum*, *Chrysopogon zizanioides*, and *Iris ssp.* achieve efficiencies greater than 80% for Cd, Zn, and Pb under controlled conditions, highlighting the influence of wetland design (vertical flow, subsurface flow, floating islands) and hydraulic retention time on performance. Furthermore, the use of ornamental species adds landscape, social, and economic benefits, favoring their implementation in urban and tourism contexts. However, research gaps were identified, including a lack of full-scale studies, a lack of standardization in data reporting, and the safe management of contaminated biomass. In conclusion, HC with ornamental plants constitutes a promising and multifunctional technology for the treatment of wastewater containing heavy metals, although its consolidation will require applied research, design optimization, and supportive policies that promote its large-scale adoption.

Keywords: Phytoremediation; heavy metals; ornamental plants; wastewater; constructed wetlands

Introducción

El agua es un recurso primario para la presencia de vida en la tierra y el acceso al agua limpia es crítico para los humanos y el ecosistema. Sin embargo, durante las últimas décadas la calidad del agua se ha visto influenciada negativamente por una población en continuo aumento, una rápida industrialización, una creciente urbanización y una utilización descuidada de los recursos naturales (Carolin *et al.*, 2017; Vardhan *et al.*, 2019; Agrawal *et al.*, 2021). La materia orgánica, los nutrientes, los productos farmacéuticos y de cuidado personal, las sustancias polifluoroalquilo y

perfluoroalquilo, los biocidas, los metales pesados, los tintes, los radionucleidos, los plásticos, las nanopartículas y los patógenos se encuentran entre los contaminantes de mayor preocupación (Villarín y Merel, 2020a)

La presencia de metales pesados en aguas residuales constituye una de las problemáticas ambientales más críticas a nivel mundial debido a su alta toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumulación en organismos vivos, comúnmente estos contaminantes provienen de actividades antropogénicas (Filote *et al.*, 2021; Abd Elnabi *et al.*, 2023; Edo *et al.*, 2024; Meftah *et al.*, 2025), sin embargo, de acuerdo con el Departamento de Energía, (2018), se ha demostrado que los metales pesados se encuentran presentes en las aguas residuales provienen de diversas fuentes; como detergentes, alimentos, cosméticos, agua del grifo, sudor y polvo, y se descargan como aguas residuales del lavabo, la cocina, la lavandería y el baño, lo cual representa un riesgo significativo para la salud humana y los ecosistemas acuáticos, al alterar procesos biogeoquímicos y comprometer la calidad del recurso hídrico (Ablankar *et al.*, 2025).

En este contexto, los humedales construidos han emergido como una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales, destacándose por su bajo costo de operación, mínima demanda energética y capacidad para integrar procesos físicos, químicos y biológicos en la depuración del agua (Prol, 2020). La incorporación de plantas ornamentales en estos sistemas ha cobrado relevancia en los últimos años, no solo por su potencial en la fitorremediación de metales pesados, sino también por los beneficios estéticos, socioeconómicos, la adaptación a ambientes contaminados y la capacidad de acumular este tipo de contaminantes en sus tejidos (Marín Giraldo *et al.*, 2020).

Sin embargo, a pesar de los avances reportados, la literatura científica sobre el desempeño de humedales construidos con plantas ornamentales en la eliminación de metales pesados aún presenta vacíos importantes. Existen variaciones significativas en cuanto a especies utilizadas, diseño del sistema, condiciones operativas, tipos de metales removidos y parámetros de eficiencia, lo que dificulta la comparación de resultados y la generación de conclusiones generalizables (Castañeda Díaz, S. R., & Díaz Alaya, E. 2024)., en este sentido, se hace necesaria una revisión sistemática que compile, analice y sintetice la información disponible, identificando tendencia, limitaciones y perspectivas futuras de investigación.

El presente artículo tiene como objetivo evaluar el estado del arte en la capacidad de eliminación de metales pesados en aguas residuales mediante humedales construidos con plantas ornamentales, con el fin de aportar un marco de referencia que oriente futuras investigaciones y promueva la implementación de soluciones sostenibles en el tratamiento de aguas residuales contaminadas por metales pesados.

Materiales y Métodos

La presente revisión sistemática se diseñó a través de la metodología PRISMA (Figura 1) con el objetivo de recopilar, analizar y sintetizar la evidencia científica sobre la capacidad que tienen las plantas ornamentales para la eliminación de metales pesados en aguas residuales mediante humedales construidos. Para garantizar un proceso transparente y reproducible, se establecieron fases metodológicas específicas: búsqueda bibliográfica, selección de estudios, extracción y análisis de datos y síntesis de resultados.

Búsqueda bibliográfica

Se realizó una búsqueda estructurada en las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed / MEDLINE y SpringerLink, complementada con la literatura técnica disponible en Google Scholar y repositorios de organismos ambientales. La búsqueda incluyó artículos publicados entre los años 2020-2025, utilizando términos clave en inglés y español relacionados con el tema: constructed wetlands, ornamental plants, heavy metals, phytoremediation, wastewater treatment, humedales construidos, plantas ornamentales, metales pesados, tratamiento de aguas residuales.

Por lo que se presentan las cadenas de búsqueda:

("constructed wetland" OR "constructed wetlands" OR "constructed wetland*" OR "CW" OR "artificial wetland*" OR "constructed wetland*")

AND ("ornamental plant*" OR "ornamental species" OR "ornamental macrophyte*" OR "Canna" OR "Heliconia" OR "Alpinia" OR "Hedychium" OR "garden plant*")
 AND ("heavy metal*" OR "metals" OR "lead" OR "cadmium" OR "chromium" OR "zinc" OR "copper" OR "nickel" OR "mercury")
 AND ("wastewater" OR "effluent" OR "industrial wastewater" OR "municipal wastewater" OR "leachate"))
 AND (PublicationDate >= 2020).

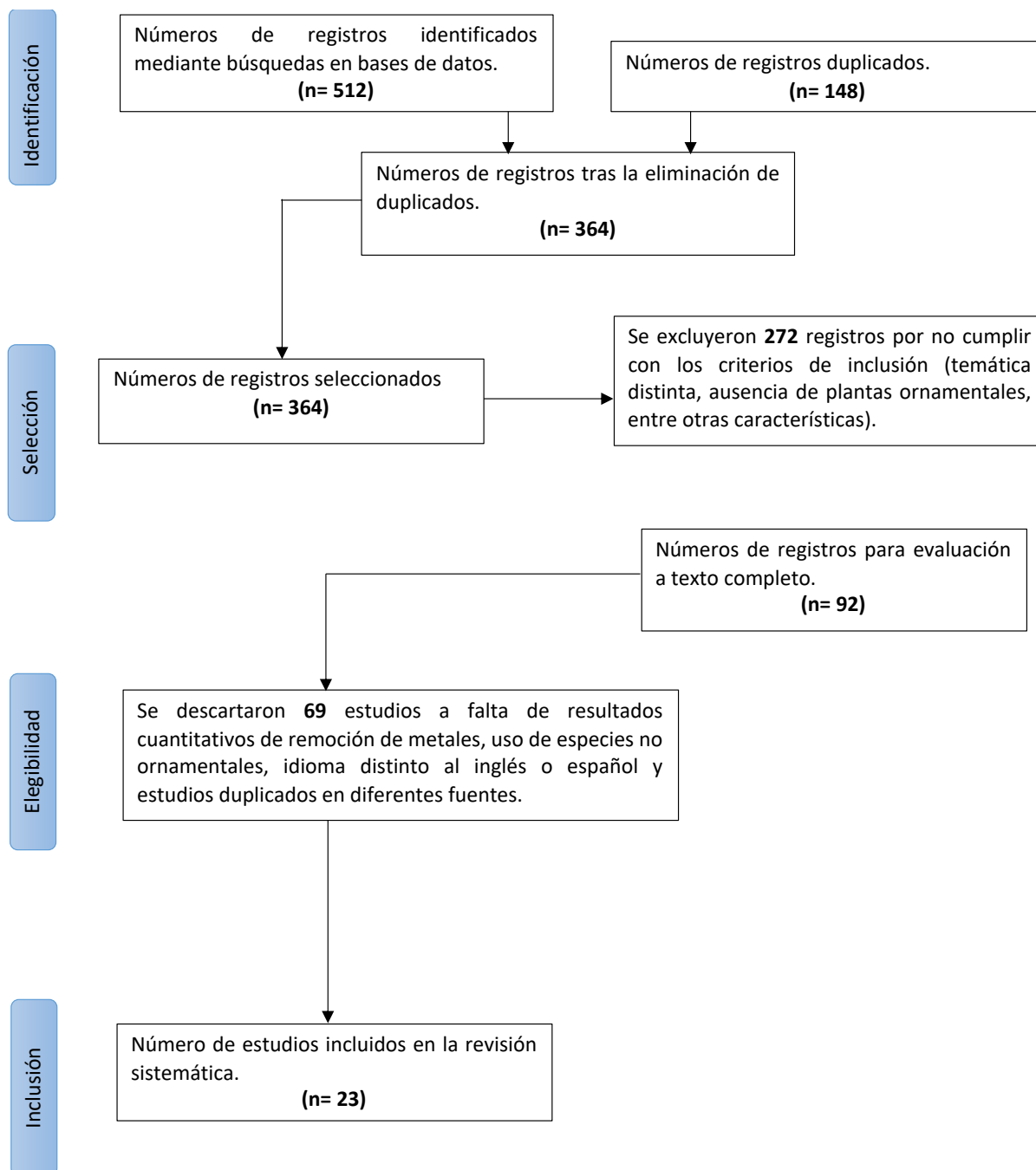


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA

Criterios de selección

Se incluyeron únicamente estudios que evaluaran humedales contruidos de flujo superficial, flujo vertical, flujo superficial libre, subsuperficial o híbridos para el tratamiento de aguas residuales, utilizaran al menos una especie de plantas ornamentales y reportaran resultados cuantitativos sobre la eliminación o bioacumulación de metales pesados

como; Cd, Pb, Cr, Zn, Ni, Cu y Hg, se excluyeron publicaciones sin acceso a texto completo, revisiones narrativas y documentos en idiomas distintos al inglés o español.

Extracción y análisis de datos

Para cada estudio incluido, se extrajo información relativa; país/tipo de agua, configuración, tipo de estudio, especie ornamental, metales pesados, metales evaluados, tiempo de retención hidráulica, porcentaje de remoción, densidad de plantación y manejo, tipo de sustrato, tipo de afluente, tiempo de seguimiento, factores ambientales, evaluación de riesgo de sesgo y resultados (concentraciones del efluente, % remoción por metal, acumulación por tejido y factores ambientales relevantes. Los datos se organizaron en matrices comparativas y se analizaron de manera descriptiva, destacando tendencias, factores determinantes de eficiencia y brechas en la investigación.

Síntesis de resultados

La información se integró mediante tablas resumen, identificando relaciones entre especies vegetales, diseño del humedal y eficiencia de remoción. Finalmente, se elaboró una discusión crítica sobre las ventajas, limitaciones y perspectivas futuras de los humedales construidos con plantas ornamentales para la eliminación de metales pesados.

Resultados y Discusión

La revisión de la literatura contempla estudios del 2020 al 2025 que evaluaron el desempeño de humedales construidos con plantas ornamentales en la eliminación de metales pesados en aguas residuales, la mayoría de los estudios se concentraron en regiones tropicales y subtropicales, principalmente en Asia y América Latina, debido a la disponibilidad de especies ornamentales adaptadas a altas cargas contaminantes y condiciones climáticas variables.

Tendencias en las especies ornamentales utilizadas

Las especies más empleadas fueron *Canna indica*, *Heliconia psittacorum*, *Zantedeschia aethiopica* y *Chrysopogon zizanioides*, destacadas por su alta tolerancia a ambientes contaminados y su capacidad para acumular metales en raíces y rizomas. Se observó que las especies con sistemas radiculares densos favorecen procesos de sedimentación y adsorción, aumentando la eficiencia del sistema. Algunos estudios reportaron eficiencias de remoción superiores al 80% para cadmio y Zinc utilizando *Canna indica*, mientras que *Chrysopogon zizanioides*, mostró valores cercanos al 70% para plomo y níquel.

Influencia del diseño y operación del humedal

El tipo de flujo del humedal influye significativamente en la remoción de metales. Los sistemas de flujo subsuperficial presentaron mejores resultados en la retención de metales debido a la mayor interacción agua-sustrato-planta, en comparación con los sistemas de flujo superficial. Asimismo, tiempos de retención hidráulica superiores a 5 días y el uso de sustratos con alta capacidad de intercambio catiónico se asociaron con incrementos en la eficiencia de eliminación.

Mecanismos predominantes de eliminación

Los mecanismos identificados incluyen precipitación química, adsorción en sustratos, acumulación en tejidos vegetales y procesos microbianos asociados a la rizosfera. La bioacumulación en raíces fue particularmente relevante, indicado el papel central de las plantas ornamentales no solo como componentes estéticos, sino también como agentes activos en la depuración de contaminantes. Sin embargo, varios estudios subrayan la necesidad de gestionar adecuadamente la biomasa cosechada para evitar la reintroducción de metales al ambiente.

Limitaciones y vacíos de investigación

A pesar de los resultados positivos, se detectaron limitaciones importantes: la mayoría de los estudios se realizaron a escala piloto, con poca información sobre el desempeño a largo plazo en condiciones reales, por otra parte, existe

escasa estandarización en los métodos de medición de metales y en los criterios de diseño, pocos trabajos analizan el destino final de los metales acumulados y la viabilidad económica del uso de especies ornamentales a gran escala.

Perspectivas futuras

La integración de humedales ornamentales con otros procesos de tratamiento, como, por ejemplo; biofiltros y sistemas anaerobios, y la selección de especie nativas de alto valor ornamental y fitorremediador se perfilan como líneas de investigación prioritarias (Sánchez-Tovar *et al.*, 2025). Además, el desarrollo de modelos predictivos que integren variables hidrológicas, químicas y biológicas podrían optimizar el diseño y operación de estos sistemas.

Tabla 1. Capacidad de eliminación de metales pesados en aguas residuales mediante humedales construidos con plantas ornamentales

Estudio (año)	País/Tipo de agua	Configuración del HC	Especie ornamental	Metales evaluados	HTR/Carga (si aplica)	Remoción (%) por metal	Observaciones clave
Boulaaras <i>et al.</i> , 2022	Argelia / Efluente de refinería	VF-SSFCW (LECA + arena)	<i>Canna indica</i>	Zn, Cd, (Cr, Cu, Fe, Pb, Al, Ni analizados)	HRT no especificado en resumen; operación continua	Zn: 96.5%; Cd: 93.5% (promedios; > control)	Desempeño superior al control no plantado; removió N y metales con alta eficacia.
Phewnil <i>et al.</i> , 2023	Tailandia / Aguas municipales (AFD)	D SSFCW de laboratorio	<i>Heliconia psittacorum</i> vs. <i>Canna indica</i>	Pb, Cd (bioacumulación)	Ensayo alternante llenado-vaciado	NA (remoción en agua no reportada); alta acumulación de Pb y Cd en raíces de <i>Heliconia</i>	<i>Heliconia</i> mostró mayor acumulación radicular; utilidad como “sumidero” de metales.
Nguyen <i>et al.</i> , 2024 (AJJ-Asia Japan)	Japón / Drenaje ácido de mina (sintético)	CW de banco con caliza + suelo limoso; modo batch	<i>Iris</i> spp. (ornamental) + <i>Typha</i>	Zn, Cd (también Fe)	HRT 4–7 días; 14.5 meses	Zn: 57–72%; Cd: 57–72%	Buenas remociones en condiciones ácidas; desempeño mantenido a largo plazo.
Álvarez-Asecencio <i>et al.</i> , 2022	México / Lixiviados de relleno sanitario (islas flotantes)	FWT (islas flotantes)	<i>Chrysopogon zizanioides</i> (vetiver)	As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, Zn	Tres diluciones de lixiviado	As: 100%; Cd: 58.1%; Cr: 33.4%; Cu: 67.8%; Fe: 58.3%; Hg: 29.4%; Pb: 69.2%; Zn: 67.2% (mejor a 100% lixiviado)	Vetiver eficaz incluso en matrices complejas; mayor desempeño a mayor carga del lixiviado.
Ang <i>et al.</i> , 2023 (Water)	India / Aguas domésticas (mesocosmos)	Batch mesocosmos (14 especies tropicales)	Incluye ornamentales (p.ej., <i>Canna</i> , <i>Iris</i>)	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn (en agua/sedimento)	-----	Rangos de remoción en agua reportados por especie y metal; además BCF/TF/EF > 1 para varios metales en especies ornamentales	Evalúa 14 especies; evidencia fuerte de captación y translocación de metales; útil para elegir especies.
Angmo S, Kharayat Y, Shah S. 2024 (CWE Journal)	India / Lixiviados (VFCW)	VFCW de laboratorio	<i>Canna indica</i> , <i>Phragmites</i> , <i>Eichhornia</i>	Cd (y parámetros convencionales)	-----	Cd: 100% (en las 3 especies); mejor desempeño global con <i>Canna</i>	Aunque <i>Phragmites</i> y <i>Eichhornia</i> no son ornamentales, <i>Canna</i> sí; destaca su superioridad.

Nota. VF-SSFCW: Humedal Construido de flujo vertical y subsuperficial, DSSFCW: Humedal construido de flujo subsuperficial con percolación descendente, CW: Humedal Construido, FWT: Humedal Construido de flujo superficial libre, VFCW: Humedal Construido de Flujo Vertical

En conjunto, los hallazgos confirman que los humedales contruidos con plantas ornamentales representan una alternativa prometedora y sostenible para la eliminación de metales pesados en aguas residuales, aunque requieren avances en escalabilidad estandarización y gestión integral para su implementación a gran escala (Bayra *et al.*, 2022; Wibowo *et al.*, 2023; Beltrán-Conlago *et al.*, 2024).

Conclusiones

La evidencia científica confirma que los humedales contruidos con plantas ornamentales representan una estrategia eficiente y sostenible para la remoción de metales pesados en aguas residuales.

De acuerdo con revisiones y mapeos de experiencias en América Latina documentan múltiples casos de humedales contruidos (HSS, VFCW, híbridos) que incorporan especies ornamentales por su doble función: remediación y valor paisajístico/uso comunitario (reutilización de aguas tratadas para riego en instalaciones verdes). Esto facilita la adopción en municipios con presupuesto limitado y turismo ecológico (Rodríguez-Domínguez *et al.*, 2020).

Estudios realizados en México con *Chrysopogon zizanioides* han mostrado altas eficiencias de remoción (superiores al 80% para Cd, Zn y Pb en condiciones controladas) esta especie se implementó como islas flotantes en lixiviados, evidenciando que vetiver es viable para tratar efluentes industriales/lixiviados en condiciones reales o mesocosmos en contextos latinoamericanos (Alberto *et al.*, 2022), atribuibles a su capacidad de bioacumulación y a la interacción sinérgica entre raíces, microorganismos y medios filtrantes. Por otra parte, las eficiencias varían en función del tipo de metal, la composición del agua, el diseño del humedal y los parámetros operativos, lo que subraya la importancia de optimizar cada sistema de acuerdo con las condiciones locales, además, el uso de potencial económico, factores clave para su implementación en entornos urbanos y turísticos.

Asimismo, experiencias en Colombia, Ecuador y Perú han documentado la aplicación de humedales ornamentales en comunidades rurales y periurbanas, favoreciendo no solo la depuración del agua, sino también la integración paisajística y el uso del efluente tratado para riego en espacios verdes (Beltrán-Conlago *et al.*, 2024).

En este sentido, la implementación de humedales ornamentales en México y otros países latinoamericanos no solo atiende la problemática de la contaminación por metales pesados, sino que también contribuye a la regeneración ambiental, al turismo ecológico y al fortalecimiento de la sostenibilidad hídrica en territorios con limitaciones presupuestales. No obstante, su consolidación a gran escala requiere avanzar en investigación aplicada, estandarización de protocolos y políticas públicas que promuevan su adopción como parte integral de la gestión de aguas residuales.

Los desafíos significativos persisten como la falta de estudios a escala real, la ausencia de protocolos estandarizados para reportar resultados, y la necesidad de abordar la gestión segura de la biomasa contaminada. Superar estos vacíos requerirá investigaciones integrales y multidisciplinarias que integren aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos.

En conclusión, los humedales contruidos con plantas ornamentales representan una solución prometedora para el tratamiento de aguas residuales con metales pesados, con potencial para contribuir a la sostenibilidad hídrica, la regeneración ambiental y la mejora del paisaje. Su consolidación dependerá de avances en investigación aplicada, innovación tecnológica y políticas que promuevan su adopción a mayor escala.

Bibliografía

- Abd Elnabi, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhalfa, S. A., Elmasry, S., ... Mahmoud, Y. A. G. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>
- Ablankar, D., Reddy, U., Shete, P., & Jain, A. (2025). Microbial community response to wastewater discharge in water bodies. En *Zero Liquid Discharge Wastewater Treatment System: From Introduction to Application* (pp. 113–130). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-84909-1_7
- Agrawal, K. K., Panda, C., & Bhuyan, M. K. (2021). Impact of urbanization on water quality. En *Current Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICRAMERD 2020* (pp. 665–673). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4795-3_60

- Álvarez-Ascencio, A., López-Martínez, S., Rodríguez-Luna, A. R., López-Hernández, E. S., Morales-Bautista, C. M., & Hernández-Núñez, E. (2022). Analysis of *Chrysopogon zizanioides* used as floating treatment wetlands in the removal of heavy metals present in leachate. *Remediation Journal*, 33(1), 77–86. <https://doi.org/10.1002/rem.21739>
- Ang, S. Y., Goh, H. W., Mohd Fazli, B., Haris, H., Azizan, N. A., Zakaria, N. A., & Johar, Z. (2023). Heavy metals removal from domestic sewage in batch mesocosm constructed wetlands using tropical wetland plants. *Water*, 15(4), 797. <https://doi.org/10.3390/w15040797>
- Angmo, S., Kharayat, Y., & Shah, S. (2024). Efficiency of *Canna indica*, *Phragmites australis* and *Eichhornia crassipes* in remediation of leachate through a vertical flow constructed wetland. *Current World Environment*, 19(2). <https://doi.org/10.12944/CWE.19.2.7>
- Barya, M. P., Kumar, A., & Thakur, T. K. (2022). Utilization of constructed wetland for the removal of heavy metal through fly ash bricks manufactured using harvested plant biomass. *Ecohydrology*, 15(4), e2424. <https://doi.org/10.1002/eco.2424>
- Beltrán-Conlago, A. C., Ledesma-Acosta, R. D., León-Fiallos, K. Z., & Paredes-Cepeda, E. R. (2024). Evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en naturaleza: Potencial para ciudades sostenibles. *MQRInvestigar*, 8(4), 1558–1578. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.4.2024.1558-1578>
- Boulaaras, A., Zoubida, Z., Boudjema, B., & Benseddik, A. (2022). Potential of *Canna indica* in vertical flow constructed wetlands for heavy metals and nitrogen removal from Algiers refinery wastewater. *Sustainability*, 14(8), 4394. <https://doi.org/10.3390/su14084394>
- Carolin, C. F., Kumar, P. S., Saravanan, A., Joshiba, G. J., & Naushad, M. (2017). Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 2782–2799. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.029>
- Castañeda Díaz, S. R., & Díaz Alaya, E. (2024). *Evaluación de la capacidad de fitodepuración de aguas residuales domésticas, mediante humedales artificiales aplicando plantas emergentes – San Bernardino, 2023*. Universidad Privada del Norte. <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/40155>
- Edo, G. I., Samuel, P. O., Oloni, G. O., Ezekiel, G. O., Ikpekor, V. O., Obasohan, P., & Agbo, J. J. (2024). Environmental persistence, bioaccumulation, and ecotoxicology of heavy metals. *Chemistry and Ecology*, 40(3), 322–349. <https://doi.org/10.1080/02757540.2024.2306839>
- Filote, C., Roşca, M., Hlihor, R. M., Cozma, P., Simion, I. M., Apostol, M., & Gavrilescu, M. (2021). Sustainable application of biosorption and bioaccumulation of persistent pollutants in wastewater treatment: Current practice. *Processes*, 9(10), 1696. <https://doi.org/10.3390/pr9101696>
- Marín Giraldo, Y., Jaramillo Salazar, M. T., & Ocampo Serna, D. M. (2020). *El cianuro en la minería: efectos sobre las plantas acuáticas*. Editorial Universidad de Caldas.
- Meftah, S., Meftah, K., Drissi, M., & colaboradores. (2025). Heavy metal polluted water: Effects and sustainable treatment solutions using bio-adsorbents aligned with the SDGs. *Discover Sustainability*, 137. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00895-6>
- Nguyen, T. T., Huang, H., Oda, M., & Soda, S. (2023). Constructed wetlands planted with *Iris* for treatment of wastewater simulating a typical mine drainage in Japan: Effects of organic-feeding on removal of Zn and Cd. *Asia-Japan Journal*, 6, 35–46. https://doi.org/10.34389/asijapan.6.0_35
- Phewnil, O., Chunkao, K., Prabhuddham, P., & Pattamapitoot, T. (2024). Application of different aquatic plants in an alternated fill and drain wetland system of Phetchaburi municipal wastewater treatment in Thailand. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(1), 1304–1313. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31266-1>
- Prol Vila, B. (2020). *Humedales construidos: sustentabilidad y comparativa con sistemas de tratamiento convencionales. Revisión crítica*. Universidade da Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/27165>
- Rodríguez-Domínguez, M. A., Konnerup, D., Brix, H., & Arias, C. A. (2020). Humedales artificiales en América Latina y el Caribe: Una revisión de las experiencias de la última década. *Water*, 12(6), 1744. <https://doi.org/10.3390/w12061744>
- Sánchez-Tovar, S. A., Navarro-Frómata, A. E., & Salgado-Bernal, I. (2025). Humedales: Tres propuestas tendientes a mitigar los daños antrópicos. *Ambiens Techné et Scientia México*, 13, 181–194. <https://atsmexico.org/atsm/article/view/204>
- Vardhan, K. H., Kumar, P. S., & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290, 111197. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>
- Villarán, M. C., & Merel, S. (2020). Assessment of current challenges and paradigm shifts in wastewater management. *Journal of Hazardous Materials*, 390, 122139. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122139>
- Wibowo, Y. G., Wijaya, C., Yudhoyono, A., Sudibyo, Yuliansyah, A. T., Safitri, H., Tsabitah, N., Nur'ani, H., Khairurrijal, K., & Petrus, H. T. B. M. (2023). Highly Efficient Modified Constructed Wetlands Using Waste Materials for Natural Acid Mine Drainage Treatment. *Sustainability*, 15(20), 14869. <https://doi.org/10.3390/su152014869>

Estudio del impacto en la desalineación por desfase de ubicación y rotación en campos de heliostatos

Job Ordaz-Castillo ¹, Héctor Daniel García-Lara ^{1,*}, Abraham Andrade-Puente ² y José Dhair Arredondo-Hernandez ²

¹ Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE), Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME), Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

² Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

* Autor de correspondencia: hector.garcialra@uanl.edu.mx

Energía Solar (Modelado y simulación computacional)

Recibido: 27 de mayo de 2025

Aceptado: 22 de julio de 2025

Publicado: 24 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.460>

Resumen: Uno de los principales problemas en proyectos termosolares son las pérdidas de energía. Para mitigar estas pérdidas es necesario realizar una correcta instalación de los heliostatos. Estudios previos han demostrado que desplazamientos de pocos milímetros reducen la concentración solar en un 10-20 %. En el presente trabajo se realizó una simulación de desfase lineal y de rotación de campo. En la simulación de desfase lineal se prueba la sensibilidad que tienen los sistemas de concentración solar a los errores de posicionamiento en los ejes "X" e "Y". Se concluyó que el impacto del error es acumulativo en ambas direcciones, es decir, los errores combinados en ambos ejes intensifican aún más la disminución de la eficiencia. Mientras que los resultados de la simulación de rotación de campo confirman que la eficiencia de concentración en un campo de heliostatos es altamente sensible a la rotación del sistema. En pequeñas desviaciones no representan un problema crítico, pero conforme aumenta el valor de desviación comienza a reducir significativamente la eficiencia de captación de energía, generando pérdidas de hasta un 65% cuando la desviación supera los 2°. El estudio sugiere que es indispensable configurar estrategias de implementación y control que ayuden a mitigar los errores de desviación, asegurando de esta manera un óptimo desempeño de las plantas solares de torre central.

Palabras clave: heliostato, desalineación, eficiencia, energía solar, simulación, trazado de rayos

Study of the impact of misalignment due to positioning and rotation offset in heliostat fields

Abstract: One of the primary issues in solar thermal projects is energy loss, which impacts the overall performance of the system. To mitigate these losses, it's necessary to ensure the correct installation of heliostats. Previous studies have shown that displacements of just a few millimeters can reduce solar concentration by 10-20%. This study simulated both linear and field rotation misalignment. The linear misalignment simulation tested the sensitivity of solar concentration systems to position errors along the "X" and "Y" axes. It was concluded that the impact of these errors are cumulative in both directions; that is, combined errors in both axes further accelerate the decrease in efficiency. Meanwhile, the field rotation simulation confirmed that the concentration efficiency in a heliostat field is highly sensitive to system rotation. Small deviations don't pose a critical problem, but as the deviation value increases, the energy capture efficiency begins to decrease significantly, leading to losses of up to 65% when the deviation exceeds 2°. The study suggests that it is essential to implement setup and control strategies to help mitigate deviation errors, thereby ensuring optimal performance of central tower solar plants.

Keywords: heliostat, misalignment, efficiency, solar energy, simulation

Introducción

En una planta termosolar, para reflejar la radiación solar a un punto donde es necesario concentrarla, se utilizan heliostatos, los cuales son un conjunto de espejos o un solo espejo modular. Durante el funcionamiento de una planta termosolar, es probable tener pérdidas de energía, ocasionadas por la imprecisión del seguimiento, la gravedad y el viento. Según Mancini (2000), a medida que los errores se acumulan, estos pueden causar un desplazamiento de la imagen del heliostato, alejándose del punto de mira previsto con el tiempo.

En un estudio realizado por Jones y Stone (1999), examinaron y detallaron fuentes distintas de error en el seguimiento de los heliostatos en la planta Solar Two, entre estas se incluían la flexión debido a la gravedad, el desplazamiento de pivote y la refracción atmosférica, entre otros. Otros errores como el desplazamiento angular en la posición de referencia de los mecanismos de seguimiento, la nivelación imperfecta del pedestal del heliostato y la falta de

perpendicularidad entre los ejes de seguimiento fueron identificados por Díaz-Félix *et al.* (2014). Adicionalmente, Gross y Balz (2020) detectaron discrepancias entre sistemas de coordenadas provenientes de diferentes fuentes, así como errores generales de seguimiento, los cuales pueden afectar el desempeño de cualquier sistema solar que dependa de esta precisión.

En un estudio realizado por Freeman *et al.* (2014), se encontraron que entre los errores de mayor impacto se encuentran los errores ocasionados por una mala instalación y por fallos de los componentes.

La deriva en los campos de heliostatos se refiere a la desviación no intencionada de los espejos respecto a sus posiciones óptimas. Esta desviación puede deberse a distintos factores siendo los errores geométricos uno de los más críticos.

En este estudio, a partir de simulaciones en MATLAB y TracePro, se analizan la pérdida de eficiencia de concentración solar causada por errores de desfase o desviación de los campos de heliostatos para distintos valores de desalineación, que provocan disminución en la precisión del heliostato hacia el objetivo.

Materiales y Métodos

Metodología

Se diseña un algoritmo y pseudocódigo de control idealizando un movimiento con 2 grados de libertad que se originan en el centro del espejo del heliostato. El análisis se implementó haciendo uso de MATLAB y TracePro en su totalidad.

Se propone un prototipo, del cual se caracterizan a detalle sus dimensiones y mecanismos en la Figura 1. Las dimensiones mencionadas fueron documentadas a precisión con el fin de usarse en el modelado y simulación (Tabla 1).

Se estableció un sistema de referencia ubicado en el objetivo a nivel del suelo a partir del cual se miden las distancias de cada uno de los elementos (espejos), de este modo se determinó la distancia del prototipo al objetivo (receptor) y las dimensiones de este (0.5 x 0.65 m), dándole una posición de 2 metros de altura a partir del origen.

Configuración y diseño del campo de heliostatos

En un código de MATLAB, se diseña un campo de heliostatos de una configuración cuadrada de 3x3, es decir, 9 heliostatos en total como se muestra en la Figura 2. La elección de esta configuración de campo de heliostatos de 3x3 se realizó con el propósito de ejemplificar de forma general la tendencia del impacto de los errores de desfase y rotación en la eficiencia, sirviendo como un modelo representativo para observar estas dinámicas. Es importante señalar que este estudio no se enfoca en la optimización o el análisis de las variables específicas del tamaño o la distribución del campo, sino en la sensibilidad del sistema ante desalineaciones.

Se aplicó un algoritmo de seguimiento que utiliza datos externos de la posición del sol correspondientes al día 21 de cada mes durante el año 2024 con incrementos de tiempo de 5 minutos, que se obtienen de datos georreferenciados

Tabla 1. Dimensiones del prototipo físico para la simulación

ARTICULACIÓN	LONGITUD
BASE-EJE	250 mm
EJE-ESPEJO	150 mm

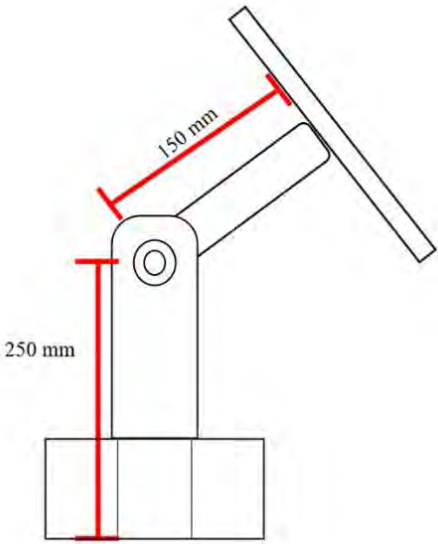


Figura 1. Dimensiones del heliostato

del lugar propuesto. El algoritmo calcula los ángulos para cada heliostato para que estos redirijan los rayos solares hacia el receptor predeterminado.



Figura 2. Diagrama representativo de la distribución del campo

Desfase de Campo 3x3

El desfase en un campo de heliostatos se refiere a la desviación de cada espejo respecto a la posición del diseño original. Este desfase es un error causado por varios factores como la inexactitud en la instalación, una incorrecta alineación inicial o diversos errores humanos de implementación. Se pretende analizar cómo estos desfases afectan la eficiencia de concentración de rayos solares sobre el receptor, con especial enfoque en el derrame de energía. Definiendo derrame de energía como pérdidas de concentración en el flujo energético que se dirigen al objetivo.

Con el objetivo de evaluar el impacto provocado por el desfase, se realizaron simulaciones en MATLAB y TracePro considerando el campo 3x3 mencionando con anterioridad. Esta vez se agregaron errores en las coordenadas de cada heliostato respecto a su ubicación original en el diseño, se varían los desplazamientos en un rango de 0 a 1000mm, específicamente usando los valores mencionados a continuación :

- Desplazamiento en eje X: 0,10,20,30,40,50,100,250,500,750,1000 mm.
- Desplazamiento en eje Y: 0, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50,100, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 750, 1000 mm.

En cada simulación se mantuvieron constantes el algoritmo de seguimiento, los parámetros de radiación solar, posición del receptor y condiciones de reflexión del espejo, de esta manera, se observa exclusivamente el efecto del desfase en la eficiencia de concentración.

Rotación de Campo 3x3

La rotación involuntaria del campo de heliostatos puede ocurrir debido a diversos factores como las imprecisiones en la calibración de la estructura de montaje o deformaciones mecánicas que afectan la orientación global del conjunto de heliostatos.

Para evaluar el efecto de rotación de campo sobre la eficiencia de concentración de rayos solares, se realizaron simulaciones en MATLAB y TracePro aplicando un giro uniforme en cada uno de los heliostatos:

- Ángulos de rotación: -2.25°, -2.00°, -1.75°, -1.50°, -1.25°, -1.00°, -0.75°, -0.50°, -0.25°, 0°, 0.25°, 0.50°, 0.75°, 1.00°, 1.25°, 1.50°, 1.75°, 2.00°, 2.25°.

Se realizó la simulación de la respuesta del campo en los mismos instantes del día y demás parámetros que la simulación de la sección anterior, manteniendo constantes posición del objetivo y condiciones de radiación. Igual que con la sección anterior, se evalúan el flujo energético y la eficiencia de concentración en cada caso, esta vez causada por la desalineación progresiva del campo.

Eficiencia normalizada

Se define la eficiencia normalizada del sistema como la energía captada por el receptor en un campo con desalineaciones dividida por la energía captada por el receptor en campo con implementación ideal. Es decir, el escenario con eficiencia máxima atribuida específicamente a este factor de pérdida y sin tomar en cuenta otros factores que perjudican al sistema.

$$\eta = \frac{E_s}{E_i} \quad (1)$$

Donde: η es la eficiencia normalizada de concentración; E_s es la energía captada por el receptor en un campo con desalineaciones; E_i es la energía captada por el receptor en campo con implementación ideal.

Resultados y Discusión

Simulación de desfase lineal de campo 3x3

Para los resultados de este apartado, se analizaron los datos del flujo energético incidente en el receptor en cada caso, identificando pérdidas de concentración en forma de desbordamiento en el receptor.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en MATLAB y TracePro de la sección de desfase lineal permiten evaluar el impacto de los errores en la eficiencia del campo. En esta sección, se analizaron desplazamientos desde el origen en los ejes X y Y, variando las posiciones de los heliostatos. El objetivo es evaluar como dichos desplazamientos afectan a la eficiencia normalizada de concentración (η) como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Eficiencia normalizada en función del desfase en "X" y "Y"

X, Y (mm)	0	10	20	30	40	50	100	250	500	1000
0	1.0000	0.9997	0.9946	0.9885	0.9807	0.9710	0.9247	0.7596	0.4808	0.2955
50	0.9929	0.9900	0.9879	0.9813	0.9728	0.9612	0.9084	0.7484	0.4784	0.2998
100	0.9638	0.9539	0.9575	0.9540	0.9499	0.9439	0.8861	0.7201	0.4807	0.3127
200	0.7001	0.6957	0.6958	0.6939	0.6941	0.6921	0.6690	0.5574	0.4214	0.3106
250	0.5130	0.5125	0.5132	0.5122	0.5122	0.5135	0.5110	0.4480	0.3659	0.2819
300	0.3243	0.3259	0.3298	0.3348	0.3342	0.3351	0.3468	0.3409	0.3070	0.2497
350	0.1657	0.1675	0.1696	0.1733	0.1732	0.1790	0.2000	0.2525	0.2435	0.2328
400	0.0565	0.0595	0.0643	0.0687	0.0719	0.0758	0.1116	0.1851	0.1999	0.2234
500	0.0110	0.0125	0.0149	0.0189	0.0234	0.0290	0.0507	0.1216	0.1318	0.1980
750	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	0.0600	0.0283	0.1217
1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0069	0.0423	0.0238

Los resultados muestran que la eficiencia normalizada se mantiene por encima de 0.95 para desplazamientos menores a 50 mm en cualquier eje, lo que sugiere que pequeños errores de instalación no afectan significativamente el rendimiento del sistema.

A partir de los 100 mm, la eficiencia cae por debajo de 0.75 en la mayoría de los casos, siendo más sensible el eje Y. En particular, desplazamientos superiores a 250 mm provocan una caída abrupta, llegando a valores cercanos al 0.5, y a partir de 500 mm, el sistema pierde más del 60% de su capacidad de concentración.

En el escenario más extremo (1000 mm), la eficiencia se aproxima a cero, indicando que la radiación reflejada no impacta en el receptor de forma efectiva. Estas tendencias reflejan una alta sensibilidad del sistema a errores acumulados de instalación, y refuerzan la necesidad de estrategias precisas de alineación desde la etapa de montaje. Con el objetivo de mostrar los resultados de manera visual, se proporcionará una gráfica del impacto del desfase de la eficiencia (Figura 3).

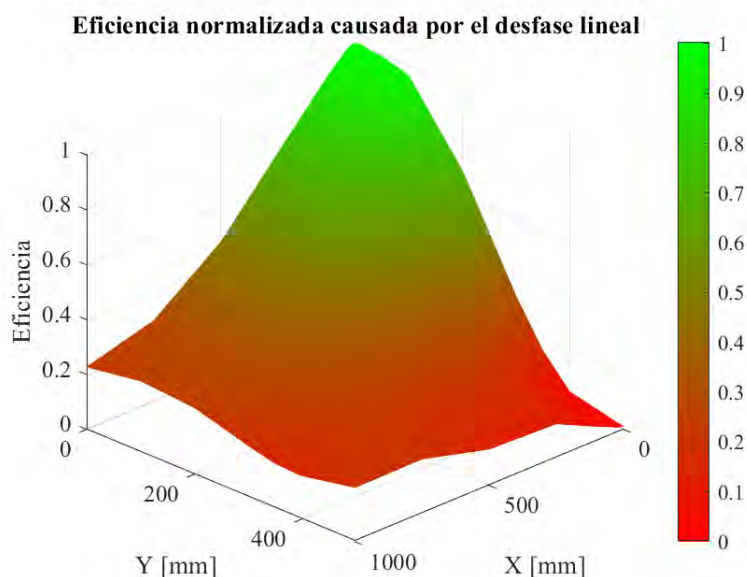


Figura 3. Resultados obtenidos en la simulación de desplazamiento lineal del campo 3X3

Pueden identificarse los siguientes patrones:

- Mapa de eficiencia en función del desfase en "X": A medida que el desplazamiento de desfase aumenta en el eje "X", se observa como la se aleja de valores altos (verde) a valores bajos (rojo), destacando una caída considerable a partir de los 250 mm.
- Mapa de eficiencia en función del desfase en "Y": el comportamiento es similar al desfase en el eje "X", la disminución de la eficiencia es muy gradual, la caída de eficiencia es más evidente en valores de desplazamiento mayores a 300 mm en "Y".
- Mapa tridimensional de eficiencia (X e Y): Se observa en el punto central (X = 0, Y = 0) una región de máxima eficiencia, esta región se reduce de manera simétrica a medida que el desfase aumenta su desplazamiento en cualquier dirección. En las regiones donde "X" y "Y" superan los 500 mm de desplazamiento se les considera zonas de baja eficiencia (Figura 4).

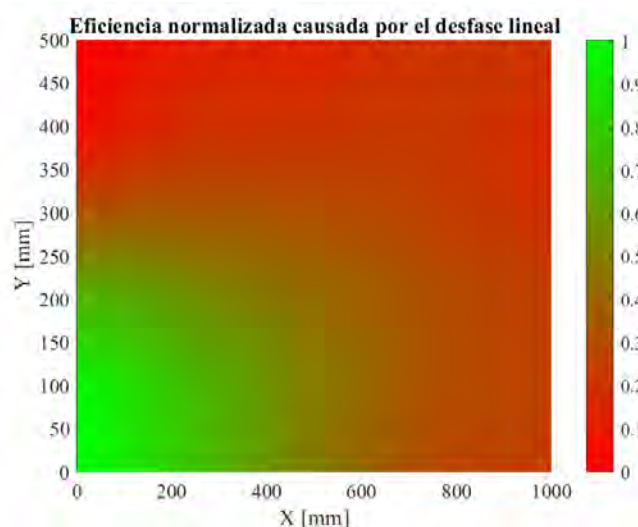


Figura 4. Resultados obtenidos en la simulación de desplazamiento lineal del campo 3X3

Simulación de rotación de campo 3x3

En la Tabla 3, se muestran los resultados obtenidos de la simulación que se realizó en MATLAB y TracePro, estos datos demuestran la relación entre la eficiencia de concentración solar y la rotación del campo de heliostatos. La eficiencia (η) es máxima cuando la rotación en el azimut del campo es de 0° , la eficiencia disminuye conforme el campo se inclina en cualquiera de las direcciones, ya sea positiva o negativa.

Se entiende por azimut ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo. (REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, n.d.)

Tabla 3. Valores de azimut (Az), energía total (E Tot), eficiencia (η) y número de rayos (#Rayos)

Az	E Tot [W]	η	#Rayos
-2.25	15.128	0.3513	186624
-2.0	17.543	0.4073	186624
-1.75	20.72	0.4811	186624
-1.5	24.83	0.5765	186624
-1.25	29.48	0.6845	186624
-1.0	34.257	0.7954	186624
-0.75	38.382	0.8912	186624
-0.5	41.365	0.9605	186624
-0.25	42.827	0.9944	186624
0.0	43.067	1.0	186624
0.25	43.058	0.9998	186624
0.25	43.058	0.9998	186624
0.5	41.612	0.9662	186624
0.75	38.775	0.9003	186624
1.0	34.37	0.7981	186624
1.25	29.47	0.6843	186624
1.5	24.813	0.5761	186624
1.75	20.69	0.4804	186624
2.0	17.638	0.4095	186624
2.25	15.117	0.351	186624

Los resultados se muestran visualmente en la Figura 5, que corresponde a una gráfica en forma de campana donde el punto de máxima eficiencia ocurre cuando la rotación es de 0° . Solo cuando la energía solar reflejada por los heliostatos es dirigida con la máxima precisión hacia el objetivo, se muestra la eficiencia más alta. Cuando el campo de heliostatos disminuye su precisión hacia el objetivo, también disminuye la eficiencia debido a la pérdida de alineación óptica en la reflexión de la radiación solar.

Para rotaciones menores a $\pm 0.5^\circ$, la eficiencia se mantiene alta ($\eta \approx 0.96$), este resultado indica que pequeñas desviaciones no alteran significativamente el rendimiento del sistema.

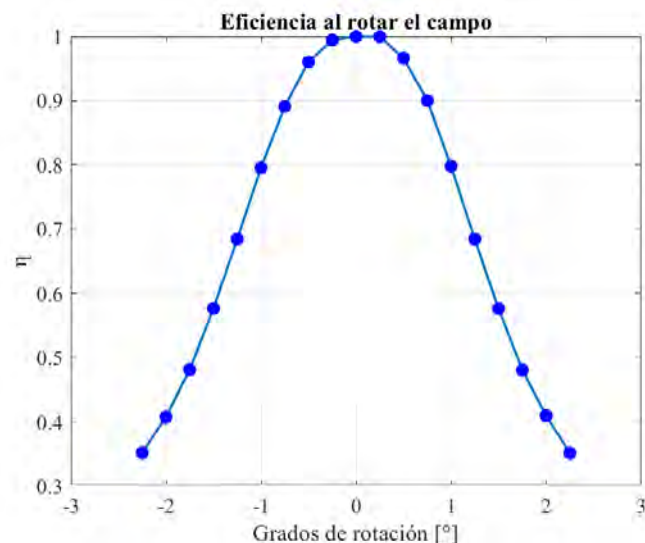


Figura 5. Resultados obtenidos en la simulación de rotación del campo 3X3

A $\pm 1^\circ$ de rotación, la eficiencia cae aproximadamente un 20%, alcanzando valores cercanos a $\eta = 0.80$, lo que indica que entre mayor sea la desviación la pérdida de rendimiento es cada vez mayor.

Cuando las desviaciones son de $\pm 2^\circ$ o superiores, la eficiencia disminuye hasta por debajo del 50% y por debajo del 35% para cuando la desviación es de $\pm 2.25^\circ$ o mayor de rotación, evidenciando pérdidas significativas en la concentración de energía

Conclusiones

En el análisis de los resultados de la simulación de desfase lineal se demuestra la sensibilidad que tienen los sistemas de concentración solar a los errores de posicionamiento en los ejes X y Y. Las pérdidas de eficiencia son despreciables para errores menores a 50 mm. Sin embargo, cuando el error es superior a los 100 mm la eficiencia se ve comprometida de manera significativa. En los casos donde los errores de posicionamiento alcanzan los 500 mm la eficiencia presenta una caída drástica, lo que demuestra que en estos escenarios la radiación reflejada no impacta correctamente en el receptor.

Las gráficas tridimensionales muestran que el impacto del error es acumulativo en ambas direcciones (X e Y), es decir, cuando se presentan errores combinados en ambos ejes aceleran aún más la disminución de la eficiencia. Los resultados obtenidos demuestran la necesidad de procedimientos de calibración rigurosos al momento de instalar y dar mantenimiento a un campo de heliostatos.

Los análisis realizados en la simulación de rotación de campo confirman que la eficiencia de concentración en un campo de heliostatos es altamente sensible a la rotación del sistema. En pequeñas desviaciones de hasta 0.5° no representan un problema crítico, pero conforme aumenta el valor de desviación comienza a reducir significativamente la eficiencia de captación de energía, llegando a generar pérdidas de hasta un 65% cuando la desviación supera los 2° .

Esto nos sugiere que es indispensable implementar estrategias de control y mantenimiento ayuden a mitigar los errores de desviación, asegurando de esta manera un óptimo desempeño de las plantas solares de torre central

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen al Programa de Apoyo a la Ciencia, Tecnología e Innovación PROACTI de la Universidad Autónoma de Nuevo León por el soporte financiero del proyecto 92-IDT-2024

Bibliografía

- Díaz-Félix, L., Escobar-Toledo, M., Waissman, J., Pitalúa-Díaz, N., & Arancibia-Bulnes, C. (2014). Evaluation of Heliostat Field Global Tracking Error Distributions by Monte Carlo Simulations. *Energy Procedia*, 49, 1308–1317. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.140>
- Freeman, J., Kiranlal, E., & Rajasree, S. (2014). Study of the errors influencing heliostats for calibration and control system design. *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014)*, 1–8. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2014.6909113>
- Gross, F., & Balz, M. (2020). Potentially confusing coordinate systems for solar tower plants. *SOLARPACES 2019: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*, 2303. AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0028942>
- Jones, S., & Stone, K. (1999). Analysis of solar two heliostat tracking error sources. *ASME International Solar Energy Conference*. ASME.
- Mancini, T. (2000). *Catalog of solar heliostats*. IEA-Solar Power and Chemical Energy Systems, Köln.
- Real Academia Española. (s.f.). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 26 de mayo de 2025 de <https://dle.rae.es/acimut?m=form>

Conversión termoquímica de residuos sólidos de naranja a través de pirólisis para la producción de biochar con diversas aplicaciones

Julia Renata Hernández-Roa ¹, Laura Mila Saavedra ², Romain Lemaire ³, Ofelia Landeta-Escamilla ¹, Norma Alejandra Vallejo-Cantú ¹, Alejandro Alvarado-Lassman ¹ y Erik Samuel Rosas-Mendoza ^{1,*}

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Av. Oriente 9, 852. Col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz C.P. 94320, México

² Research and Development Institute for the Agri-Environment, 2700 Einstein Street, Quebec City, Quebec, Canada

³ TFT Laboratory, Department of Mechanical Engineering, École de technologie supérieure, Montreal, Quebec H3C 1K3, Canada

* Autor de correspondencia: eriksamuelfm@hotmail.com

Energías Renovables (Waste to Energy)

Recibido: 12 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 25 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.571>

Resumen: El procesamiento de naranja para la obtención de jugo fresco, jugo concentrado, aromas, aceites, entre otros, genera una gran cantidad de residuos sólidos, que representan una oportunidad para revalorizar dichos residuos por medio de tratamientos termoquímicos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue producir biochar a partir de residuos sólidos de naranja (RSN) por medio de pirólisis para evaluar sus propiedades y determinar su potencial en diversas aplicaciones. Se recolectaron RSN en el Mercado Municipal Emiliano Zapata, los cuales fueron acondicionados, mediante un proceso de secado para ser sometidos a un proceso de pirólisis lenta a 550 °C en un reactor escala laboratorio tipo Auger. La caracterización fisicoquímica de los RSN reveló un alto contenido de fracción orgánica representada como sólidos volátiles (94.00 ± 0.38 %), lo que la convierte en una biomasa adecuada para conversión termoquímica. El rendimiento del proceso de pirólisis fue de 30.31 % de biochar (fase sólida), 15.99 % de fase aceitosa y 16.37 % de fase acuosa, obteniendo además un 37.32 % de gases no condensables. La caracterización del biochar mostró propiedades fisicoquímicas favorables, como un pH alcalino (8.53), 96.9 % de materia seca y elevados contenidos de potasio y calcio y otros macronutrientes. Las propiedades del biochar obtenido indican que se trata de un material con gran potencial para aplicaciones diversas, tales como: mejorador de suelos, ayuda en la remoción de contaminantes, secuestrador de carbono o como aditivo en procesos biológicos como digestión anaerobia.

Palabras clave: residuos sólidos de naranja, procesos termoquímicos, pirólisis, biochar

Thermochemical conversion of orange solid waste through pyrolysis for the production of biochar for different applications

Abstract: The processing of oranges to obtain fresh juice, juice concentrate, aromas, oils, among others, generates a large amount of solid waste, which represents an opportunity to revalorize such waste by means of thermochemical treatments. Therefore, the objective of this work was to produce biochar from orange solid waste (OSW) by pyrolysis to evaluate its properties and determine its potential for different applications. OSW were collected from the Emiliano Zapata Municipal Market, conditioned and subjected to a slow pyrolysis process at 550 °C in an Auger-type laboratory scale reactor. The physicochemical characterization of the OSW showed a high content of organic fraction represented as volatile solids (94.00 ± 0.38 %), conforming its suitability for thermochemical conversion. The yield of the pyrolysis process was 30.31 % biochar (solid phase), 15.99 % oily phase and 16.37 % aqueous phase, obtaining in addition 37.32 % non-condensable gases. Characterization of the biochar showed favorable physicochemical properties, such as an alkaline pH (8.53), 96.9 % dry matter and high contents of potassium and calcium and other macronutrients. The properties of the biochar obtained indicate that it is a material with great potential for different applications, such as soil improver, removal of contaminants, carbon sequestrant or additive in the anaerobic digestion process.

Keywords: solid orange waste, thermochemical processes, pyrolysis, biochar

Introducción

Actualmente, la producción de naranja a nivel mundial alcanza aproximadamente 48.8 millones de toneladas, siendo México el cuarto productor de naranja del mundo detrás de Brasil, China y la Unión Europea (USDA, 2024). La naranja es el cítrico más predominante plantado en México y el estado de Veracruz posee casi la mitad del área total cosechada, contando con una producción de 2.2 millones de toneladas, lo que representa el 43 % de la producción total anual (SIAP, 2024). El residuo que se produce después de extraer el jugo de la naranja representa aproximadamente el 50 %

de la masa total de la fruta fresca y la composición de este residuo se divide de la siguiente manera, cáscara (60 a 65 %), pulpa (30 a 35 %) y semillas (0 a 10%) (de Lima *et al.*, 2022). Este residuo contiene altos niveles de azúcares, celulosa, hemicelulosa, lignina, pectina y otros compuestos que lo hacen adecuado para ser empleado como biomasa en diversos procesos de aprovechamiento (Yaradoddi *et al.*, 2022). La valorización de los residuos sólidos de naranja por métodos termoquímicos para obtener biochar no compite directamente con la obtención de otros productos como aceites esenciales, pectina, compuestos fenólicos (Sharma *et al.*, 2022), sino que; la pirólisis como método termoquímico es una alternativa para enriquecer la cadena de valor. Además, la conversión de residuos cítricos por medio de pirólisis en biochar puede ser no sólo económicamente competitivo, también contribuye al aprovechamiento de residuos procedentes de la agricultura (Jian *et al.*, 2020). La obtención de cáscara de naranja como biomasa permite obtener un recurso renovable que puede ser empleado en la producción de energía, ya que la biomasa se considera globalmente un tipo de energía libre de carbono debido a su ciclo en la vegetación. La biomasa se ha convertido en la cuarta energía utilizada después del carbón, el petróleo y el gas natural (Wang y Wu, 2023).

Por su parte, la conversión termoquímica de la cáscara de naranja es una opción rentable para convertir esta biomasa en productos con diferentes aplicaciones, utilizando métodos basados en el calor. Generalmente, este tipo de conversiones de biomasa consisten en tecnologías de combustión, licuefacción, torrefacción, pirólisis y gasificación (Joshi *et al.*, 2024). De esta manera, la pirólisis se caracteriza por ser un proceso de descomposición térmica de la biomasa a temperaturas de 400 a 800 °C sin la adición de oxígeno externo, teniendo como producto tres fracciones principales: biochar, bioaceite y gas de síntesis (Danso-Boateng *et al.*, 2022). El proceso de pirólisis se llevó a cabo en un reactor tipo Auger, seleccionado por las ventajas que ofrece frente a otros equipos. Este tipo de reactor permite operar de manera continua y controlada, asegurando tiempos de residencia definidos y una buena distribución de la biomasa gracias a su tornillo sin fin. Además, presenta menos problemas de taponamiento en comparación con otros sistemas como los de lecho fijo. Estas características hacen que el reactor Auger sea una opción práctica y escalable para el tratamiento de residuos sólidos de naranja. (Le Roux *et al.*, 2022). El biochar, como producto principal de la pirólisis ha ganado interés por sus múltiples beneficios en el cuidado del ambiente, gracias a su estructura porosa y su estabilidad (Manga *et al.*, 2023). El biochar tiene diversas aplicaciones y puede utilizarse para mejorar suelos, filtrar contaminantes en el agua, capturar carbono e incluso ayudar en procesos biológicos como la digestión anaerobia, donde puede estabilizar el sistema y mejorar la producción de biogás (Webber y Quicker, 2018).

En años recientes, múltiples estudios han explorado el aprovechamiento de biochar obtenido a partir de diversas biomásas como aditivo para optimizar diversos procesos ambientales, por ejemplo; 1) Sugiarto *et al.* (2021), evaluaron el efecto del biochar producido a partir de aserrín de pino por pirólisis sobre la digestión anaerobia de residuos alimentarios. La adición de biochar incrementó la producción de metano en un 46.9 % y la tasa diaria en un 43.0 %. 2) Kabir *et al.* (2023), investigaron la influencia de la incorporación de biochar en las propiedades del suelo y su potencial para abordar problemas ambientales a través de la mejora de su composición. 3) López-Puga (2023), evaluó el poder calorífico de los biocombustibles sólidos obtenidos a través de dos procesos termoquímicos teniendo como biomasa mezclas de cítricos. 4) Jayawardhana *et al.* (2019) estudiaron el biochar como ayuda en la eliminación de contaminantes orgánicos, empleando biochar obtenido mediante pirólisis de residuos sólidos urbanos para la eliminación de bencenos alquilados, logrando capacidades de adsorción de 850 µg/g para tolueno y 550 µg/g para m-xileno. 5) Kane *et al.* (2020), estudiaron biochar derivado de lignina con alta conductividad eléctrica para ser usado como aditivo de electrodo conductor dentro de las baterías de iones de litio. En la actualidad, existe el reto de encontrar opciones viables que permitan utilizar el residuo sólido de naranja como fuente de biomasa para ser empleada en procesos termoquímicos para la obtención de biochar. Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo fue producir biochar a partir de residuos sólidos de naranja por medio de pirólisis para evaluar sus propiedades y determinar su potencial en aplicaciones sustentables.

Materiales y Métodos

Recolección de residuos sólidos de naranja (RSN)

Como materia prima se utilizaron RSN, se recolectaron 20 kg de los residuos que se generan en los establecimientos comerciales y de jugos del Mercado Municipal Emiliano Zapata. Los RSN se cortaron en trozos pequeños (2-3 cm) para facilitar su manejo y su posterior análisis. Usualmente, los RSN están compuestos mayoritariamente por agua,

carbohidratos estructurales, además de aceites esenciales (principalmente D-limoneno), compuestos fenólicos, y pequeñas cantidades de proteínas y minerales (de Lima et al., 2022).

Caracterización de los residuos sólidos de naranja

Se realizó una caracterización fisicoquímica de los RSN mediante las siguientes determinaciones analíticas:

Para la medición de potencial de hidrógeno (pH), se preparó una suspensión de 10 g de RSN y 20 mL de agua destilada, manteniéndose en agitación durante 30 min. Después de esto se dejó reposar durante 15 minutos. Posterior a esto, se realizó la lectura del pH con Potenciómetro OAKTON por triplicado. La humedad se determinó mediante el método gravimétrico, secando la muestra a 110 °C en un crisol previamente a peso constante, durante 24 h en una estufa de secado marca Riossa hasta obtener peso constante. La cantidad de sólidos totales (ST) se midió como la fracción no evaporada después del secado de la muestra a 105 °C durante 24 h, utilizando crisoles previamente sometidos a peso constante. La determinación de cenizas se realizó a partir de la muestra seca, por medio de calcinación a 550 °C durante dos horas en una mufla marca Barnstead Thermolyne 1300 Furnace, obteniendo el contenido de cenizas en base seca. Los sólidos volátiles (SV) fueron cuantificados a partir de la muestra obtenida en la determinación de ST, mediante la diferencia de pesos entre los ST y el residuo después de la calcinación.

Acondicionamiento de los residuos sólidos de naranja

Debido al alto contenido de humedad de los RSN (79.93 %), fue necesario someterlos a un proceso de secado previo al proceso de pirólisis. Los RSN se secaron al sol durante 72 horas, permitiendo reducir la humedad sin el uso de energía eléctrica. Para la caracterización de los RSN secos, se realizaron las mismas determinaciones analíticas mencionadas en la caracterización de RSN antes del secado. Después del secado, los RSN se trituraron y tamizaron hasta obtener un tamaño de partícula entre 1.0 y 3.8 mm antes de ser sometidos al proceso de pirólisis.

Proceso de pirólisis de los residuos sólidos de naranja

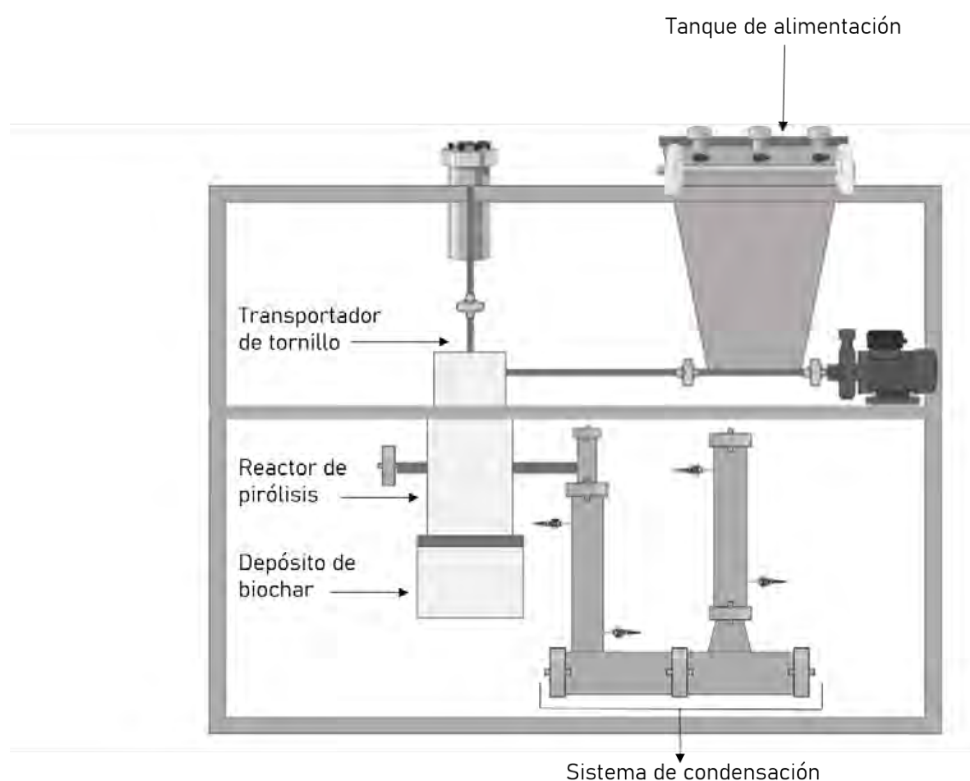


Figura 1. Reactor de pirólisis tipo AUGER para la conversión termoquímica de RSN

Después del acondicionamiento de los RSN, la pirólisis se llevó a cabo en un reactor de escala laboratorio, de tipo Auger diseñado y patentado por el Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA), Québec,

Canadá, como se presenta en la Figura 1. Las condiciones bajo las cuales se operó dicho reactor fueron: Temperatura de 550 ° C, tiempo de residencia de 104 s y caudal de nitrógeno 3 L/min. Los RSN se ingresaron al reactor de pirólisis mediante dos transportadores de tornillo sin fin. La descomposición térmica ocurrió en ausencia de oxígeno dentro del reactor, generando biochar como el residuo sólido, el cual fue recolectado en un tanque. Los vapores resultantes se enviaron a un sistema de condensación para recuperar el bioaceite, mientras que, los gases no condensables fueron liberados a la atmósfera.

Para evaluar la pirólisis, en términos de rendimiento de los tres productos obtenidos, se calculó el porcentaje de cada fase mediante la relación entre la masa del producto obtenido y la masa de biomasa introducida al reactor de pirólisis.

Caracterización general, composición elemental, macro y micronutrientes del biochar

El biochar producido fue caracterizado a través de las siguientes determinaciones analíticas:

- Propiedades generales: pH, materia seca, contenido de cenizas, materia orgánica (MO), y carbono orgánico (CO).
- Composición elemental: Carbono total (CT) y nitrógeno total (mediante analizador elemental tipo LECO), así como nitrógeno total Kjeldahl (digestión con solución H₂SO₄ y detección colorimétrica).
- Contenido de macro y micronutrientes: P, K, Ca, Mg, Na, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Ni, Cd, Cr, Co, Pb, Ba, Sr, S determinados después de la digestión ácida de acuerdo con el método EPA 3050B y análisis por espectrometría de plasma acoplado inductivamente.

Resultados y Discusión

Caracterización de residuos sólidos de naranja antes y después del secado

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de los RSN antes y después del secado disponibles para la pirólisis se presentan en la Tabla 1. En total se secaron alrededor de 20 kg de RSN, de los cuales se obtuvieron 4.8 kg de RSN secos.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de materia prima húmeda y seca para ser sometida a pirólisis.

Determinación	RSN húmedos	RSN secos
pH	3.91 ± 0.02	3.48 ± 0.01
Humedad (%)	79.93 ± 0.57	11.80 ± 9.57
Cenizas (%)	4.78 ± 0.46	6.00 ± 0.38
ST (%)	20.07 ± 0.57	88.20 ± 9.57
SV (%)	95.22 ± 0.46	94.00 ± 0.38

Las determinaciones fueron realizadas por triplicado.

Los RSN presentaron un alto contenido de humedad en su estado fresco (79.93 %), posterior al secado se puede notar una reducción significativa con un valor de 11.80 % lo que resalta la importancia del secado previo para la aplicación de la pirólisis. En cuanto a los ST, en estado húmedo se obtuvo un valor de 20.07 %, mientras que en estado seco alcanzaron 88.20 %, lo cual evidenció la eficiencia del secado al reducir el contenido de agua. Por otro lado, el contenido de SV fue alto en ambas muestras (húmeda y seca), con valores de 95.22 % y 94.00 %, respectivamente. Esta diferencia no fue significativa, lo que indica que un alto contenido de materia orgánica presente.

Los RSN secos presentaron un pH ligeramente ácido (3.48), superior al reportado por López-Puga (2023) para mezcla de cítricos (2.85). En términos de contenido de cenizas (6.00 %), los RSN secos mostraron un valor considerablemente menor que otros residuos como los de piña (18.8 % según Vamvuka *et al.*, 2023). Además, los ST (88.20 %) y los SV (94.00 %) indicaron una alta proporción de materia orgánica disponible, superando a la mezcla de cítricos de López-Puga (2023) (70.87 % ST) y a la cascarilla de arroz reportada por Zou *et al.* (2024) (62.7 % SV).

Proceso termoquímico de pirólisis

En la Tabla 2 se presentan los productos obtenidos a partir del proceso de pirólisis de RSN y sus respectivos rendimientos. La biomasa inicial utilizada tuvo un peso total de 2,900 g. Como productos de dicho proceso se obtuvieron tres fracciones principales: 1) Biochar, 2) Fase aceitosa y 3) Fase acuosa como se aprecia en la Figura 2. El biochar representó la mayor fracción sólida con un rendimiento del 30.31 %, seguido de la fase aceitosa (15.99 %) y la fase acuosa (16.37 %). La suma de estas tres fracciones representa el 62.68 % del total de la biomasa tratada, mientras que el 37.32 % restante corresponde a productos gaseosos no condensables.

Tabla 2. Productos obtenidos del proceso de pirólisis y rendimiento de cada fase

Producto	Peso (g)	Rendimiento (%)
Biomasa inicial	2,900	
Fase sólida (biochar)	879.1	30.31
Fase aceitosa	463.7	15.99
Fase acuosa	474.8	16.37
Suma de las tres fases anteriores		62.68
Productos gaseosos no condensables		37.32



Figura 2. Fases obtenidas a partir de la pirólisis a) Fase sólida (biochar) y b) Fases aceitosa y acuosa

Los resultados obtenidos en la pirólisis de los RSN, se alinean con las tendencias observadas en la literatura para biomásas lignocelulósicas. Por ejemplo, estudios como Ko *et al.* (2024), quienes analizaron la pirólisis de residuos lignocelulósicos a 550 °C y reportaron un rendimiento de biochar cercano al 28%, así como una fracción líquida dividida en una fase aceitosa (16.66 - 20.24%) y una fase acuosa (17.16 - 22.68%). En comparación con otros materiales como residuos de madera o cáscara de coco analizados por Babu *et al.* (2023), quienes generaron a 600 °C entre 22.61 % y 30.80 % de biochar respectivamente, mostrando así que los RSN se ubican en un rango intermedio.

Caracterización de biochar

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización realizada al biochar obtenido. El biochar obtenido a partir de RSN presentó un pH de 8.53, lo que indica una alcalinidad moderada, este valor es similar al reportado por Chávez-Garcías *et al.* (2019) (8.51), pero menor al de otros estudios como Devens *et al.* (2018) (9.78) o López-Puga. (2023) (11.2). La materia seca (96.9 %) y la materia orgánica (79.6 %) sugieren una adecuada estabilidad estructural del material carbonoso.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del biochar

pH	Cenizas (%)	Materia seca (%)	MO (%)	CO (%)	CT (%)
8.53	20.4	96.9	79.6	46.2	60.0

Los resultados obtenidos del análisis de macronutrientes y minerales realizado al biochar se presentan en las Tablas 4 y 5, respectivamente. En cuanto a su composición mineral, el biochar presentó contenidos elevados de potasio (29,697 mg/kg) y calcio (38,822 mg/kg), similares a los de López-Puga. (2023) (K = 32,414 mg/kg, Ca = 31,249 mg/kg) y superiores a los de Jiang *et al.* (2019) (K = 15,100 mg/kg, Ca = 25,800 mg/kg). También se detectaron cantidades menores de magnesio (2,861 mg/kg), el cual es comparable al de Jiang *et al.* (2019) (2,500 mg/kg) y López-Puga (2023) (3,746 mg/kg). Entre los micronutrientes, destacan valores de boro (67.4 mg/kg), zinc (27.5 mg/kg), manganeso (23.8 mg/kg), hierro (115 mg/kg) y cobre (9.70 mg/kg). Estas concentraciones son similares a las encontradas por Chávez-García *et al.* (2019) y López-Puga (2023), aunque Feitosa *et al.* (2020) reportaron valores mucho mayores como hierro (585 mg/kg) y cobre (370 mg/kg). El contenido de metales pesados como cadmio, plomo y cobalto no fueron detectables, lo que indica un nulo riesgo toxicológico para aplicaciones ambientales.

Tabla 4. Macronutrientes del biochar de RSN

N Total (mg/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)
2.13	2,729	29,697	38,822	2,861

Tabla 5. Composición mineral del biochar de RSN

Na (mg/kg)	Al (mg/kg)	B (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)
309	17.6	67.4	9.70	115
Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)
23.8	27.5	0.50	4.78	0
Cr (mg/kg)	Co (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ba (mg/kg)	S (mg/kg)
1.82	0	0	142	632

Con base en los resultados obtenidos a partir de la caracterización del biochar, se observó que el biochar es apto para ser aplicado como mejorador del proceso de digestión anaerobia. Esto es, debido a que presenta un pH ligeramente alcalino, esto brindará estabilidad al proceso amortiguando el efecto de los ácidos grasos volátiles (AGVs) producidos durante la digestión anaerobia. También, se observó que existe presencia de macro y micro nutrientes que favorecen el metabolismo de las comunidades microbianas durante la digestión anaerobia. Además, la ausencia notable de metales pesados, asegura que las comunidades microbianas no correrán riesgo su metabolismo por presencia de materiales tóxicos. Todo esto pone de manifiesto que el biochar producido a partir de residuos sólidos de naranja, posee un potencial como mejorador del proceso de digestión anaerobia.

Conclusiones

Los residuos sólidos de naranja demostraron ser una biomasa adecuada para procesos termoquímicos debido a su alto contenido de sólidos volátiles y materia orgánica. Después del proceso de pirolisis, se logró obtener un biochar con rendimiento de 30.31 % y se alcanzaron a recuperar subproductos líquidos como la fase líquida y la fase aceitosa. El biochar obtenido a partir de residuos sólidos de naranja mostraron una composición rica en nutrientes esenciales y un pH alcalino que lo hacen potencialmente útil en aplicaciones ambientales. En procesos biológicos, como la digestión anaerobia, puede contribuir en la estabilidad del proceso, ayuda como soporte microbiano y aportar nutrientes para las poblaciones microbianas. Como mejorador de suelos, la alcalinidad del biochar puede ser útil para remediar suelos ácidos y aportar nutrientes principalmente en suelos con deficiencias minerales en sistemas agrícolas. Finalmente, la ausencia de metales pesados (Cd, Pb, Co) garantiza un uso seguro para sistemas ambientales.

Agradecimientos y financiamiento: Al Tecnológico Nacional de México por el apoyo para la realización de esta investigación. A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el otorgamiento de la beca nacional con número de registro 4019882. Al programa Líderes Emergentes en las Américas (ELAP) de Global Affairs Canada por la asignación de la beca con número 001273805. Al equipo de ingeniería agroambiental del Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) por el apoyo brindado durante la estancia.

Bibliografía

- Chávez-García, E., Aguillón-Martínez, J., Sánchez-González, A., & Siebe, C. (2020). Characterization of untreated and composted biochar derived from orange and pineapple peels. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 413–427. <https://doi.org/10.20937/RICA.53591>
- Danso-Boateng, E., & Achaw, O.-W. (2022). Bioenergy and biofuel production from biomass using thermochemical conversions technologies—a review. *AIMS Energy*, 10(4), 585–647. <https://doi.org/10.3934/energy.2022030>
- de Lima, L. F., Monteiro, V. C., Barquilha, C. R., & Braga, M. B. (2022). Production of biochars derived from sewage sludge and orange peels. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 24(1), 1–15. <https://doi.org/10.5902/2236117062692>
- Feitosa, A., Teixeira, W., Ritter, E., Resende, F., & Kern, J. (2020). Characterization of biochar samples of banana peels and orange bagasse carbonized at 400 and 600 °C. *Revista Virtual de Química*, 12(4), 901–912. <http://rvq.sbgq.org.br>
- Jayawardhana, Y., Gunatilake, S. R., Mahatantila, K., Ginige, M. P., & Vithanage, M. (2019). Sorptive removal of toluene and m-xylene by municipal solid waste biochar: Simultaneous municipal solid waste management and remediation of volatile organic compounds. *Journal of Environmental Management*, 238, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.097>
- Jiang, Q., Chen, Y., Yu, S., Zhu, R., Zhong, C., Zou, H., Li, G., & He, Q. (2020). Effects of citrus peel biochar on anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge and its direct interspecies electron transfer pathway study. *Chemical Engineering Journal*, 398, 125643. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125643>
- Joshi, N. C., Sinha, S., Bhatnagar, P., Nath, Y., Negi, B., Kumar, V., & Gururani, P. (2024). A concise review on waste biomass valorization through thermochemical conversion. *Current Research in Microbial Sciences*, 6, 100237. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100237>
- Kane, S., Storer, A., Xu, W., Ryan, C., & Stadie, N. (2022). Biochar as a renewable substitute for carbon black in lithium-ion battery electrodes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(37), 12226–12233. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02974>
- Le Roux, É., Barnabé, S., Godbout, S., Zamboni, I., & Palacios, J. (2022). Production and characterization of two fractions of pyrolysis liquid from agricultural and wood residues. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(8), 3333–3343. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01015-2>
- López-Puga, A. (2023). *Conversión de residuos cítricos mediante procesos termoquímicos para la producción de biocombustibles* (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico de Orizaba, México.
- Manga, M., Aragón-Briceño, C., Boutikos, P., Semiyaga, S., Olabinjo, O., & Muoghalu, C. (2023). Biochar and its potential application for the improvement of the anaerobic digestion process: A critical review. *Energies*, 16(10), 4051. <https://doi.org/10.3390/en16104051>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). *Escenario mensual de productos agroalimentarios: Naranja*. Dirección de Análisis Estratégico. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/938469/Naranja_Julio.pdf
- Sharma, P., Vishvakarma, R., Gautam, K., Vimal, A., Kumar, V., Farooqui, A., Varjani, S., & Younis, K. (2022). Valorization of citrus peel waste for the sustainable production of value-added products. *Bioresource Technology*, 351, 127064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127064>
- Sugiarto, Y., Sunyoto, S. N., Zhu, M., Jones, I., & Zhang, D. (2021). Effect of biochar addition on microbial community and methane production during anaerobic digestion of food wastes: The role of minerals in biochar. *Bioresource Technology*, 323, 124585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124585>
- United States Department of Agriculture (USDA). (2024). *Citrus annual: Mexico* (GAIN Report No. MX2024-0063). Foreign Agricultural Service. Recuperado de https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Citrus%20Annual_Monterrey%20ATO_Mexico_MX2024-0063.pdf
- Wang, Y., & Wu, J. J. (2023). Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113754>
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240–261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>
- Yaradoddi, J., Banapurmath, N., Ganachari, S., Soudagar, M. E., Sajjan, A., Kamat, S., & Ali, M. A. (2022). Bio-based material from fruit waste of orange peel for industrial applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 3186–3197. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.016>

Plan de negocio para la obtención de oro, aprovechando los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE'S); caso de estudio celulares

Helen Monserrat Leyva-Martínez ¹, Saúl Hernández-Islas ^{2,*}

¹ Pasante de la Carrera de Ing. Ambiental, IPN-UIBI, Ciudad de México, México

² Departamento de Bioingeniería, IPN-UIBI, Ciudad de México, México

* Autor de correspondencia: saulhernandezislas@yahoo.com.mx; Tel.: 52 5540135353

Desarrollo Sustentable (Economía Circular)

Recibido: 29 de mayo de 2025

Aceptado: 13 de julio de 2025

Publicado: 25 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.462>

Resumen: El presente proyecto aborda la problemática del manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE'S), destacando su impacto ambiental y social, así como la necesidad de implementar soluciones sostenibles. En el contexto de la obsolescencia programada y el creciente consumismo, el manejo inadecuado de estos residuos ha generado problemas significativos, como la contaminación por metales pesados y otros componentes tóxicos. Estos elementos afectan tanto al medio ambiente como a la salud humana, particularmente en países como México, donde el reciclaje de RAEE es insuficiente. La propuesta se centra en la creación de ECOGOLD, una empresa de minería urbana enfocada en la extracción de metales preciosos, como el oro, a partir de dispositivos electrónicos obsoletos, principalmente teléfonos móviles. Este modelo de negocio busca aprovechar la recuperación de materiales valiosos mediante procesos eficientes y sostenibles, contribuyendo a la economía circular. La visión de ECOGOLD es convertirse en un referente nacional en la gestión de RAEE, destacando por su innovación y compromiso ambiental. Para lograr esto, se ha desarrollado un enfoque técnico que incluye procesos como la trituración, separación mediante corrientes de Foucault, separación magnética de alta intensidad y lixiviación ácida, optimizando la recuperación de oro y minimizando el impacto ambiental. La propuesta integra un análisis de mercado que identifica como principales clientes a empresas del sector tecnológico y electrónico, quienes utilizan el oro en la fabricación de productos-, adicionalmente se resalta la importancia de implementar tecnologías de control ambiental, como lavadores de gases (scrubber) y sistemas de contención, para mitigar emisiones de gases tóxicos y proteger los recursos naturales. La extracción de oro a partir de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) mediante el método de extracción electroquímica representa una opción viable desde el punto de vista ambiental, social y económico.

Palabras clave: reciclaje, RAEE'S, economía circular, obsolescencia programada, impacto ambiental

Business plan for extracting gold from waste electrical and electronic equipment (RAEE); cell phone case study

Abstract: This project addresses the issue of waste electrical and electronic equipment (WEEE) management, highlighting its environmental and social impact, as well as the need to implement sustainable solutions. In the context of planned obsolescence and growing consumerism, the improper management of this waste has generated significant problems, such as contamination by heavy metals and other toxic components. These elements affect both the environment and human health, particularly in countries like Mexico, where WEEE recycling is insufficient. The proposal focuses on the creation of ECOGOLD, an urban mining company focused on the extraction of precious metals, such as gold, from obsolete electronic devices, primarily mobile phones. This business model seeks to leverage the recovery of valuable materials through efficient and sustainable processes, contributing to the circular economy. ECOGOLD's vision is to become a national benchmark in WEEE management, standing out for its innovation and environmental commitment. To achieve this, a technical approach has been developed that includes processes such as crushing, eddy current separation, high-intensity magnetic separation, and acid leaching, optimizing gold recovery and minimizing environmental impact. The proposal integrates a market analysis that identifies its main clients as companies in the technology and electronics sectors, which use gold in the manufacture of products. Additionally, it highlights the importance of implementing environmental control technologies, such as gas scrubbers and containment systems, to mitigate toxic gas emissions and protect natural resources. Extracting gold from waste electrical and electronic equipment (RAEE) using the electrochemical extraction method represents a viable option from an environmental, social, and economic perspective.

Keywords: recycling, RAEE, circular economy, planned obsolescence, environmental impact

Introducción

En un contexto global de creciente demanda de productos electrónicos, el volumen de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) ha alcanzado niveles alarmantes. En México, se generan aproximadamente más de 1.1 millones de toneladas de RAEE al año (SEMARNAT, 2020), de las cuales un porcentaje significativo no recibe tratamiento adecuado. Estos desechos contienen metales valiosos como el oro, utilizado en componentes electrónicos debido a sus propiedades de conducción y resistencia a la corrosión. Sin embargo, solo un porcentaje muy bajo de este metal se recupera, mientras que el resto se pierde en vertederos o se maneja de forma ineficiente. Esto genera una problemática medioambiental y económica, donde la falta de reciclaje adecuado no solo incrementa los desechos tóxicos, sino que también desaprovecha recursos valiosos que podrían reintegrarse a la economía mediante prácticas de economía circular. La contaminación por residuos no conoce fronteras, por lo que redundaría en interés de todos comprometerse con la prevención de residuos e invertir en su gestión allí donde falte. (UNEP, 2024). En este contexto, surge ECOGOLD, una empresa mexicana enfocada en la recuperación de oro y otros metales preciosos a partir de RAEE en el estado de Jalisco. Su objetivo principal es contribuir a la economía circular a través de métodos de reciclaje electroquímico que permiten extraer el oro de manera eficiente y sostenible. Con un enfoque de minería urbana, ECOGOLD ofrece una solución innovadora que no solo reduce el impacto ambiental de los desechos electrónicos, sino que también provee a la industria tecnológica y de joyería de materiales de origen reciclado, apoyando sus esfuerzos de sostenibilidad. (RECYEL, 2025).

ECOGOLD se posiciona, así como una respuesta innovadora y responsable ante el problema de los RAEE en México, promoviendo un ciclo de vida extendido para los materiales y brindando una alternativa rentable y sostenible para los sectores que requieren metales preciosos. La empresa busca impactar positivamente en el medio ambiente y contribuir a un modelo de desarrollo económico más respetuoso con el entorno y alineado con las metas de sostenibilidad internacional.

El impacto ambiental de los RAEE es prolongado y significativo. Los componentes que contienen metales valiosos, como el oro y el cobre, podrían recuperarse y reutilizarse; sin embargo, su potencial se desperdicia cuando no se reciclan adecuadamente, lo cual implica una pérdida de recursos y una mayor necesidad de extraer estos materiales de la naturaleza, contribuyendo al cambio climático por el aumento en la emisión de gases de efecto invernadero. A su vez, el proceso de fabricación de nuevos productos electrónicos demanda grandes cantidades de energía y materias primas, lo que presiona aún más los recursos naturales. Desde el punto de vista social, el mal manejo de los RAEE genera desigualdades y pone en riesgo la salud de quienes trabajan en el reciclaje informal. En países en desarrollo, los residuos electrónicos suelen exportarse a vertederos informales donde los trabajadores, incluidos niños, realizan tareas de reciclaje en condiciones peligrosas y sin las protecciones necesarias. Estas prácticas exponen a las comunidades más vulnerables a la toxicidad de los componentes de los RAEE, perpetuando un ciclo de pobreza y explotación.

Frente a esta problemática, la creación de empresas comprometidas con el reciclaje de residuos electrónicos, como ECOGOLD, se vuelve indispensable. A través de un enfoque de minería urbana y la recuperación de metales preciosos a partir de RAEE, ECOGOLD representa una alternativa sostenible que contribuye a mitigar el impacto ambiental y social de la obsolescencia programada y el consumismo. Su compromiso con la economía circular no solo disminuye la contaminación, sino que también proporciona materiales de origen reciclado a industrias como la tecnológica y la joyera, promoviendo una cadena de suministro más ética y sostenible.

Materiales y Métodos

El presente proyecto se llevó a cabo siguiendo el protocolo para conformar un Plan de Negocio:

- Identificación de la Problemática
- Justificación
- Objetivo General y Objetivos Específicos
- **Estudio de Mercado:** Definición del Producto o servicio, Investigación de las cantidades de demanda y oferta en el contexto del mercado de los celulares y de su reciclaje, Proyecciones a futuro, Modelo Canvas, Benchmarking, determinación de Demanda Potencial Insatisfecha, Determinación de capacidad de planta.

- **Estudio Técnico:** Una vez determinada la capacidad de la planta se procede a trabajar en la ingeniería básica e Ingeniería de detalle, dimensionando cada área, cada departamento, cada operación unitaria. Se determinan las características de la maquinaria, equipo e instalaciones necesarias para recuperar oro de celulares de acuerdo con la capacidad de la planta fijada.

Es importante mencionar que cada proceso implementado cumple con los principios de “Producción más limpia”. En este contexto se selecciona el PROCESO HIDROMETALÚRGICO (LIXIVIACIÓN DINÁMICA ÁCIDA), que acuerdo con Ramírez (2008) el proceso hidrometalúrgico empleado para la extracción de oro de celulares es el más efectivo donde utiliza un sistema de lixiviación dinámica con oxígeno y ácido sulfúrico.

- **Estudio Económico:** Se determina el Costo de Producción (Mano de obra, materias primas, insumos, costos indirectos, calidad, mantenimiento, depreciación y amortización), para posteriormente obtener el costo total de operación (costo de administración más costo de ventas (vender, mercadear, publicitar). También se determina y gráfica el punto de equilibrio.
- **Estudio Financiero:** Se determina el Estado de Resultados Proforma, la TMAR, TIR y VPN, así como se realiza el Análisis de Sensibilidad.

Por último, se presentan las conclusiones sobre si es viable desde el punto de vista ambiental, social y económico el invertir en este modelo de negocio.

Resultados y Discusión

Descripción general de ECOGOLD

ECOGOLD es una empresa dedicada a la minería urbana, especializada en la extracción de oro a partir de residuos electrónicos, particularmente de dispositivos móviles en desuso. Enfocada en la región de Jalisco, México, ECOGOLD se compromete a promover una economía circular a través del reciclaje y la recuperación de materiales valiosos que, de otra forma, terminarían como residuos contaminantes. Como una empresa socialmente responsable, ECOGOLD emplea métodos innovadores de extracción para asegurar un proceso eficiente y seguro para el medio ambiente. La empresa no solo busca minimizar el impacto ecológico asociado con los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, sino también satisfacer la demanda de metales preciosos de sectores como el tecnológico. ECOGOLD se orienta a ofrecer una alternativa sostenible y ética en la cadena de suministro de estos sectores, contribuyendo así a la conservación de recursos naturales y la reducción de la explotación minera tradicional.



Figura 1. Logotipo de ECOGOLD

Descripción del servicio

El servicio de ECOGOLD se centra en la extracción de oro a partir de componentes electrónicos reciclados en específico de teléfonos celulares en su placa base. Esta tecnología permite una recuperación precisa y eficiente del oro que contienen dispositivos como teléfonos móviles, evitando métodos contaminantes tradicionales. ECOGOLD está comprometida con un proceso ambientalmente responsable y económico, promoviendo una economía circular en el mercado de metales preciosos.

Estudio de mercado y análisis de competencia oferta

Actualmente en México existen 3 empresas líderes que se dedican al reciclaje de “Residuos Eléctricos y Electrónicos” que son: PROAMBI, REMSA y RLGA, a pesar de tener cedes en diferentes estados de la República mexicana solo se recicla el 10% de lo generado por año.

En la siguiente tabla podemos observar las toneladas generadas de RAEE's en México y el 4% de lo generado equivale a teléfonos celulares (SEMARNAT 2023).

Tabla 1. Datos registrados de las toneladas de RAEE's generados por año datos recopilados de SEMARNAT, PROAMBI

Año	SEMARNAT (ton)	Celulares (4%) (ton)
2006	256 186	10 247.44
2007	268 946	10 757.84
2008	281 705	11 268.2
2009	294 465	11 778.6
2010	307 224	12 288.96
2011	319 924	12 796.96
2012	332 624	13 304.96
2013	345 324	13 812.96
2015	370 724	14 828.96
2016	383 424	15 336.96
2017	396 124	15 844.96
2018	900 000	36 000
2019	1 100 000	44 000
2020	1 103 570	44 142.8
2021	1 211 580	48 463.2
2022	1 492 599.4	59 703.976
2023	1 676 047.4	67 041.896

Conforme a la tabla 1 se establece que en el año 2023 se generaron 67,041.90 toneladas de celulares los cuales de acuerdo con SEMARNAT (2020b), solo el 10 % son reciclados de manera formal por empresas como son PROAMBI, REMSA, RLGA como se puede apreciar en la siguiente tabla 3.

Tabla 2. Toneladas de Residuos Eléctricos y Electrónicos por las empresas de PROAMBI, REMSA y RLGA

Año	PROAMBI	REMSA	RLGA	Toneladas Totales
2012	S/I	250	S/I	250
2013	12454	1250	83.7	12454
2014	3.6	1250	80.93	1334.53
2015	13.67	1250	68.24	1331.91
2016	8.84	1250	70.5	1329.34
2017	S/I	1250	71.8	1321.8
2018	S/I	1250	72	1322

Tabla 3. Toneladas de celulares reciclados por PROAMBI, REMSA Y RLGA partiendo que el 4% de los RAEE's son celulares (periodo 2015-2021)

Año	PROAMBI	REMSA	RLGA	Toneladas Totales
2015	0.5468	50	2.73	53.28
2016	0.3536	50	2.82	53.17
2017	0.5577	50	2.87	53.43
2018	0.6625	50	2.88	53.54
2019	0.7673	50	2.95	53.72
2020	0.8721	50	3	53.87

Por lo anterior se considera entonces que anualmente en México se hace el acopio de 67,041.896 ton de celulares, pero de esta cantidad las empresas antes mencionadas recolectaran únicamente el 10% de estos dispositivos generados, dejando disponible para el aprovechamiento 60, 337.71 ton de celulares. Sin embargo, la empresa únicamente recolectara los dispositivos que son almacenados por los usuarios, siendo esta cantidad correspondiente al 40% de los celulares sin tratar (SEMARNAT, 2020b), dejándonos con la cantidad de 24,135.08 ton.

Finalmente, al ser una Pyme se tiene la capacidad para trabajar con un 2% de esta cantidad siendo así que la cantidad de dispositivos que se podrán aprovechar será de 482.70 toneladas, los datos antes mencionados se aprecian en la siguiente tabla 4, en el periodo del 2023.

Tabla 4. Datos generales de toneladas desde la generación hasta el porcentaje de propuesta

Año	Generación	Celulares (4%)	10% Reciclado por las empresas	Toneladas de celulares sin tratar	Toneladas de celulares que podemos tratar (2%)
2012	332,624.00	13,304.96	1,330.50	11,974.46	95.8
2013	345,324.00	13,812.96	1,381.30	12,431.66	99.45
2014	358,024.00	14,320.96	1,432.10	12,888.86	103.11
2015	370,724.00	14,828.96	1,482.90	13,346.06	106.77
2016	383,424.00	15,336.96	1,533.70	13,803.26	110.43
2017	396,199.70	15,847.99	1,584.80	14,263.19	114.11
2018	900,000.00	36,000.00	3,600.00	32,400.00	259.2
2019	1,100,000.00	44,000.00	4,400.00	39,600.00	316.8
2020	1,103,570.00	44,142.80	4,414.28	39,728.52	317.83
2021	1,211,580.00	48,463.20	4,846.32	43,616.88	348.94
2022	1,492,599.40	59,703.98	5,970.40	53,733.58	429.87
2023	1,676,047.40	67,041.90	6,704.19	60,337.71	482.7

Empresas como Foxconn, LG, Samsung, Flextronics, Intel, HP, Panasonic, Ericsson y Motorola, presentes en México, son potenciales clientes de ECOGOLD debido a su alta demanda de metales preciosos, como el oro, para la fabricación de sus productos electrónicos. Estas compañías, que dependen de componentes de alta calidad y sostenibilidad, podrían beneficiarse de los servicios de recuperación y reciclaje de oro que ofrece ECOGOLD, contribuyendo a sus esfuerzos por reducir el impacto ambiental y optimizar el uso de recursos en sus procesos de producción estas empresas están asentadas en Jalisco por lo que por cuestiones de logística son muy rentables.

Demanda

Demanda potencial insatisfecha

Tabla 5. Toneladas de celulares sin tratar proyección a 10 años

Año	Toneladas de celulares a tratar (2%)	g oro/toneladas de celulares	Ton oro anuales	Kg de oro anuales
2024	535.53	185,828.40	0.19	185.83
2025	588.36	204,160.67	0.2	204.16
2026	641.19	222,492.93	0.22	222.49
2027	694.02	240,825.20	0.24	240.83
2028	746.85	259,157.47	0.26	259.16
2029	799.68	277,489.74	0.28	277.49
2030	852.51	295,822.00	0.3	295.82
2031	905.34	314,154.27	0.31	314.15
2032	958.17	332,486.54	0.33	332.49
2033	1,011.01	350,818.80	0.35	350.82
2034	1,063.84	369,151.07	0.37	369.15

Estudio técnico

Tabla 6. Composición promedio de un celular

Composición de un celular promedio	%	Parte del celular
40% metales	Cobre (Cu) 15-20 Aluminio (Al) 05-oct	(cables, circuitos impresos, conectores). (estructuras internas, carcasas).
0.1-0.2% metales preciosos	Hierro (Fe) 05-oct Oro (Au) 0.03-0.05 Plata (Ag) 0.1-0.15 Paladio (Pd) 0.01	(componentes de sujeción, chasis). (contactos eléctricos, placa base y chip) (circuitos) (soldaduras)
20-25% plásticos	Materiales comunes: polietileno (PE), policarbonato (PC), polipropileno (PP).	
15-20 % fibra de vidrio	Principalmente utilizada en la composición de placas de circuitos impresos (PCB).	
10-15 % cerámica	Utilizadas en condensadores, aisladores y componentes especializados (por ejemplo, el recubrimiento de chips).	

Diagrama de flujo

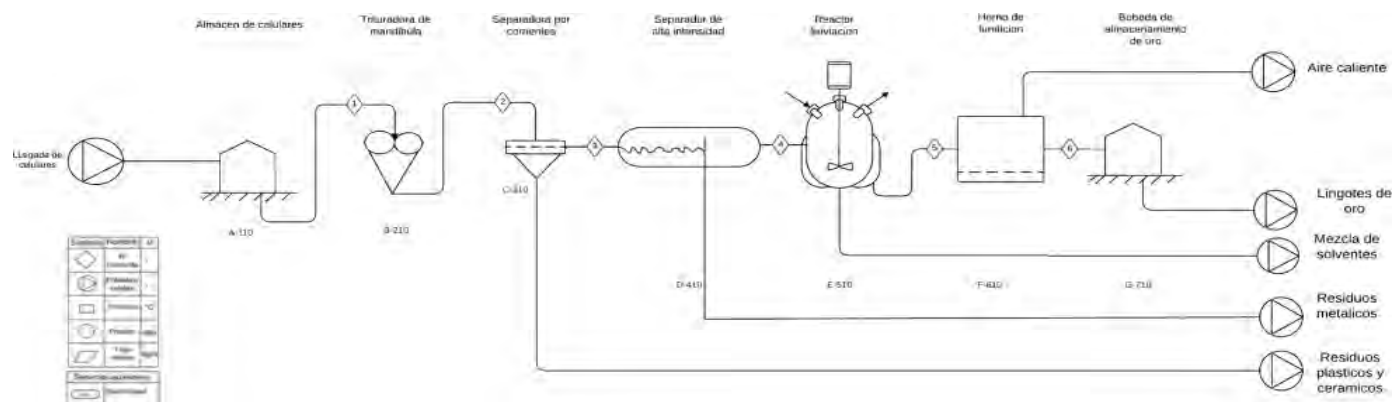


Figura 1. Diagrama de proceso hidrometalúrgico (creación propia)

Descripción del Proceso: proceso hidrometalúrgico (lixiviación dinámica ácida)

De acuerdo con Ramírez (2008) el proceso hidrometalúrgico empleado para la extracción de oro de celulares es el más efectivo donde utiliza un sistema de lixiviación dinámica con oxígeno y ácido sulfúrico. A continuación, se describe la metodología y condiciones de trabajo, así como el equipo utilizado.

1. **Recolección del Teléfono Móvil:** Trituración de Teléfono móvil y separación de los metales de otros residuos
2. **Selección de Piezas con Oro, Zinc, Cobre y Hierro**
3. **Lixiviación de Metales:**
4. **Recuperación del Oro:** Después de la lixiviación, se filtran los sólidos para recuperar el oro.
5. **Refinación del Oro:** El oro recuperado se funde y se refina para eliminar impurezas y obtener oro de alta pureza.
6. **Tratamiento de Residuos:** Los residuos sólidos y líquidos generados se tratan conforme a las regulaciones ambientales, asegurando la neutralización y reciclaje adecuado de los productos químicos utilizados. Se puede recuperar los metales presentes en lixiviado.

Presentación del producto

En nuestra empresa se obtendrán lingotes de oro de 1 kg, esta medida es debido a que nuestros competidores ofrecen su producto en la misma presentación y así mismo para poder entrar en el mercado internacional estos lingotes deben tener como mínimo el peso antes mencionado.

Ubicación de la planta: Después de aplicar el método de ponderación por puntos se selecciona el lugar donde se localizará la Planta: Parque Industrial el Salto en Jalisco, México.

Localización de la planta (Lay-Out): Para esta sección se utilizó la metodología conocida como Systematic Layout Planning, con el fin de organizar el espacio de trabajo de todos los departamentos en la planta para lo cual se proponen las siguientes superficies para cada uno de los departamentos/áreas:

1. Área de Procesamiento (2350 m²)
2. Oficinas y Áreas de Trabajo (300 m²)
3. Espacios Comunes y Jardines (175 m²)

Capacidad de Producción: Se tratarán en total 541.26 ton de celulares al año, para obtener 27 lingotes de oro (27.063 kg). La facturación estimada es de debido \$35,000,000 al año. Lo anterior representa una recolección diaria de 1.86 toneladas al día de celulares. de tratamiento de celulares será la siguiente:

Estudio económico

Tabla 7. Costo Total de Producción (creación propia)

Concepto	Mes	1 kg de Oro
Mano de Obra	\$71,880.22	\$31,872.40
Materia Prima	\$158,498.97	\$70,280.00
Insumos	\$65,785.89	\$29,108.80
Indirectos	\$304,699.50	\$134,822.79
Calidad	\$122,882.22	\$54,372.66
Mantenimiento	\$79,955.56	\$35,378.56
Depreciación	\$40,456.38	\$17,901.05
Amortización	\$3,833.33	\$1,696.17
Costo Total de Producción	\$847,992.07	\$375,432.43

Tabla 8. Monto de la Inversión (creación propia)

Activo fijo	\$5,224,085.90
Activo diferido	\$720,000.00
Capital de trabajo	\$1,137,800.67
Monto total de inversión	\$7,081,886.57

Tabla 9. Precio de Venta (creación propia)

Concepto	Mes	1 kg de Oro
Costo Total de Operación	\$1,509,142.07	\$668,592.84
Costo financiero	\$112,070.85	\$49,588.87
Impuestos	\$482,925.46	\$213,683.83
Utilidad	\$528,199.72	\$233,716.69
Ingresos por venta al mes/ Precio de Venta	\$2,632,338.11	\$1,165,582.23

Tabla 10. Matriz para Punto de Equilibrio (creación propia)

	Piezas	Ingreso de ventas	Costo fijo	Costo variable	Costo total	Diferencia	Dinero a costo
Q (Punto de equilibrio)	3	3,496,746.70	15,073,261.45	335,889.75	15,409,151.20	-11,912,404.5	15,409,151.20
	7	8,159,075.64	15,073,261.45	783,742.76	15,857,004.21	-7,697,928.6	15,857,004.21
	14.3062	16,675,027.72	15,073,261.45	1,601,766.27	16,675,027.72	0	16,675,027.72
	20	23,311,644.70	15,073,261.45	2,239,265.02	17,312,526.47	5,999,118.23	17,312,526.47
	27	31,470,720.34	15,073,261.45	3,023,007.77	18,096,269.22	13,374,451.12	18,096,269.22

Estudio financiero

Tabla 11. Estado de Resultados Pro- forma (creación propia)

Concepto	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Capacidad	50%	60%	70%	80%	100%
Importe por venta	\$6,585,539.63	\$16,121,401.01	\$23,134,210.45	\$27,232,270.58	\$35,231,750.06
Otros ingresos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Costo de producción	\$2,121,193.25	\$5,396,315.62	\$8,083,680.80	\$9,977,571.73	\$13,594,441.48
Utilidad Marginal	\$4,464,346.38	\$10,725,085.39	\$15,050,529.65	\$17,254,698.85	\$21,637,308.58
Utilidad Bruta	\$1,463,139.84	\$5,350,813.00	\$7,797,155.60	\$8,783,471.64	\$10,652,388.01
Utilidad neta	\$951,040.90	\$3,478,028.45	\$4,288,435.58	\$4,830,909.40	\$5,858,813.41
Flujo neto de efectivo	\$507,252.60	\$2,849,891.91	\$3,440,943.05	\$3,707,405.19	\$4,327,231.38

Tabla 12. PRI, TMAR, TIR y VPN (creación propia)

PRI (Periodo de Recuperación de Inversión)	\$7,081,886.57	3.08 años
TMAR (Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento)	14.19%	
TIR (Tasa Interna de Retorno)	27.70%	
VPN (Valor Presente Neto)	\$4,039,206.85	

Tabla 13. Análisis de Sensibilidad (creación propia)

Incremento	Costo	VPN	TIR	¿Es rentable?
-	Original	\$4,039,206.85	27.70%	Sí
50%	Mat. Prima	\$4,557,315.55	22.04%	Sí
50%	Los tres al mismo tiempo	\$688,818.02	15.80%	Sí

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación podemos concluir que la extracción de oro a partir de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE'S) mediante el método de extracción electroquímica representa un avance significativo en la gestión de desechos electrónicos y la recuperación de metales preciosos; representando un modelo de negocio viable desde el punto de vista ambiental, social y económico. La generación de RAEE'S, en específico de celulares, cada año va en aumento y en México no se cuenta con la infraestructura adecuada para acopiar, almacenar, dismantelar, dar tratamiento y recuperar el oro que se encuentra principalmente en los "Chips" y tarjetas electrónicas presentes en el interior de un celular. Técnicamente es posible producir lingotes con las características que hemos presentado en nuestra Propuesta de Valor, bajo el concepto de producción más limpia, y a

que se cuenta con las materias primas e insumos necesarios para tal fin. Por otro lado, nos apegaremos a las condiciones de la oferta y la demanda de lingotes de oro en el mercado, ofreciendo calidad y un precio competitivo. La inversión inicial es de \$7,081,886.57 (pesos mexicanos), con un periodo de recuperación de 3.08 años. Con una VPN de \$4,039,206.01 y una TIR de 25.7 % la cual es mayor que la TMAR (14.8%).

Agradecimientos y financiamiento: A nuestra “Alma Mater” el IPN-UIPIBI. Sin financiamiento.

Bibliografía

- Organización de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2024). *El mundo debe superar la era de los desechos y convertirlos en recursos: Informe de la ONU*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-mundo-debe-superar-la-era-de-los-desechos-y>
- Ramírez. (2008). *Recuperación de oro a partir de chatarra electrónica* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Recuperacion%20de%20oro%20a%20partir%20de%20chatarra%20electronica.pdf>
- RECYEL. (2025). *Economía circular y minería urbana: claves para empresas que buscan sostenibilidad*. <https://www.recyel.com/articulos/economia-circular-mineria-urbana-claves-empresas-sostenibilidad>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020a). *Buscan Semarnat y PNUD manejo adecuado de residuos electrónicos para evitar afectaciones a la salud y al medio ambiente*. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/buscan-semarnat-y-pnud-manejo-adecuado-de-residuos-electronicos-para-evitar-afectaciones-a-la-salud-y-al-medio-ambiente>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020b). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos* (1.a ed.). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>

Análisis de las actividades y uso de la tierra mediante imágenes satelitales durante 2023 del municipio de Santo Domingo Zanatepec, Oaxaca

Gabriela Lizbeth Sanchez-Miguel, Hirvin Gorospe Zetina *, Francisco Javier Naranjo-Luna, Rodolfo Campos-Tenorio, Mario Adrian Lopez Ortiz, Maria Guadalupe de los Santos Zavala

Sistemas de Información Geográfica, Forestal, Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: Gorospezh@itsjc.edu.mx; Tel.: 9241470999

Desarrollo Sustentable (Agricultura Sustentable)

Recibido: 19 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 2 de marzo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.553>

Resumen: El análisis de las actividades agrícolas, ganaderas, forestales, así como la distribución del uso de la tierra en el municipio de Santo Domingo Zanatepec, Oaxaca, durante el año 2023. Se realizó mediante el uso de imágenes satelitales. Se emplearon herramientas como ArcGIS 10.8 y LandViewer. Aplicando métodos de clasificación supervisada para identificar áreas específicas de cultivo, huertas de mango, ganadería, cuerpos de agua y zonas erosionadas. Los resultados reflejan una precisión del 88.11% en la clasificación de usos del suelo, destacando la importancia de estas herramientas en la toma de decisiones para el desarrollo sostenible del municipio. Se concluye que la integración de datos geoespaciales y teledetección es crucial para mejorar la gestión de los recursos naturales y mitigar los impactos ambientales.

Palabras clave: agrícola, ganaderas, teledetección, imágenes, clasificación

Analysis of land activities and use using satellite images during 2023 in the municipality of Santo Domingo Zanatepec, Oaxaca

Abstract: The analysis of agricultural, livestock areas, and forestry activities, as well as land use distribution in the municipality of Santo Domingo Zanatepec, Oaxaca, during 2023, was carried out using satellite imagery. Tools such as ArcGIS and LandViewer were used, applying supervised classification methods to identify specific crop areas, mango orchards, livestock, water bodies, and eroded areas. The results reflect an accuracy of 88.11% in land use classification, highlighting the importance of these tools in decision-making for the sustainable development of the municipality. It is concluded that the integration of geospatial data and remote sensing is crucial to improve natural resource management and mitigate environmental impacts.

Keywords: agriculture, livestock, remote sensing, images, classification

Introducción

El uso de la tierra esta caracterizado por las funciones que se desarrollan sobre la cobertura del suelo, actividades realizadas por el hombre para producir, cambiarla o mantenerla (Gamarra, 2017). El análisis de las actividades agrícolas, ganaderas, forestales y usos del suelo a través de imágenes satelitales es fundamental para comprender la relación entre el ser humano y el medio ambiente.

El análisis visual de imágenes se realiza empleando tres bandas del sensor coincidiendo con la capacidad de los monitores, empleados en informática, monitores RGB (rojo, verde y azul) (Navarro, 2018). Una imagen satelital representa visualmente la información capturada por el sensor montado en un satélite artificial (Amézquita Becerra & Pérez Castillo, 2009).

Villatoro (2021) menciona que la misión completa de SENTINEL-2 comprende satélites gemelos de órbita polar en la misma órbita, en fase a 180° entre sí. La serie de satélites de observación de la tierra Sentinel-2 puede proporcionar imágenes de teledetección de alta resolución espacial, espectral y temporal gracias a sus sensores de instrumento multispectral. Las resoluciones espaciales de Band1, Band9 Band10 (60m) Band5, Band6, Band7, Band8A, Band12 (20m) y Band2, Band3, Band4, Band8 (10 m) (Zhang *et al.*, 2021).

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en el territorio que comprende el municipio de Santo Domingo Zanatepec, se localiza en la parte sureste en el estado de Oaxaca, forma parte de la región Istmo que integra al distrito de Juchitán, las coordenadas geográficas entre las que se encuentra ubicado son los paralelos 16° 28' latitud norte del trópico de cáncer y los meridianos 94°28' longitud oeste del meridiano de Greenwich, a 60 metros sobre el nivel del mar, El municipio cuenta con una superficie territorial de 1,024.49 kilómetros cuadrados (Figura 1).

Los datos espacio-temporales referentes al cambio de uso de suelo provienen de una fuente variada como son las fotografías aéreas, imágenes satelitales, cartas topográficas digitalizadas y mapas digitales. La característica principal de estos datos es que presentan una ubicación geográfica (coordenadas planas), facilitando la localización de un evento en un territorio dado.

Se utilizaron imágenes satelitales ya que actualmente son de fácil acceso lo que da paso al estudio de diferentes aspectos de la tierra; Para el preprocesamiento de las imágenes satelitales se siguió la metodología adoptada de la propuesta realizada por (Pastrana,2011) (Figura 2).

El material base utilizado fueron imágenes del satélite, Sentinel-2B de las bandas 2, 8ª y 11 (son representaciones gráficas del espectro electromagnético) obtenidas de LandViewer, necesarias para su incorporación en ArcGIS 10.8 (Paucar,2024), también se utilizó la cartografía de la división política municipal de México, a una escala de 1:250000.

La clasificación supervisada es la técnica de clasificación de imágenes se basa en agrupar píxeles que poseen regiones del espectro similares y que pueden asociarse con diferentes clases de coberturas del suelo. Este conocimiento se puede obtener mediante mediciones de campo, imágenes aéreas, cartografías del área de estudio o expertos en el dominio de las regiones u objetos de clasificar (Robles,2007). Para el análisis en Sentinel 2, se utilizó la clasificación supervisada de máxima verosimilitud (MLC), clasificador que se basa en el un pixel pertenezca a una clase particular:

$$D = \ln(ac) - [0.5 \ln(|Covc|)] - [0.5(X - Mc)^T (Covc - 1)(X - Mc)] \quad (1)$$

Donde D es la distancia ponderada (probabilidad) c es una clase particular ; X es el vector de medición del pixel candidato; Mc es el vector medio de la muestra de clase c; ac es el porcentaje de probabilidad de que cualquier pixel candidato sea miembro de la clase c(el valor predeterminado es 1.0 o se integren a partir del conocimiento a priori); Covc es la matriz de covarianza de los píxeles en la muestra de la clase c; |Covc| es el determinante de Covc (álgebra matricial); Covc – 1 es el intervalo de Covc, ln es la función logaritmo natural; y T es la función de transposición (Iema, 2021).



Figura 1. Macrolocalización del municipio de Santo Domingo Zanatepec

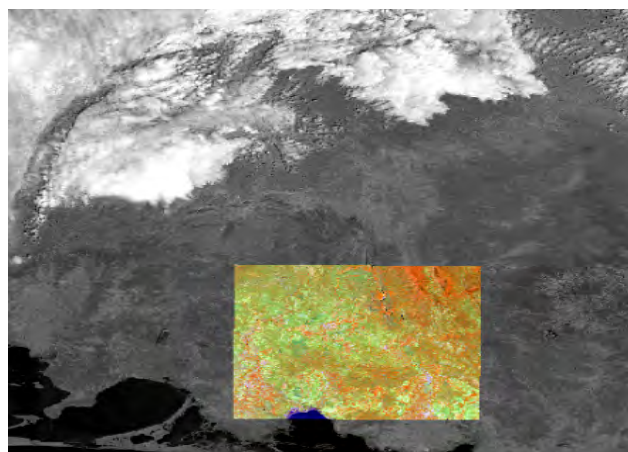


Figura 2. Macrolocalización del municipio de Santo Domingo Zanatepec

Matriz de Confusión. La matriz de confusión se constituye a partir de una imagen de satélite con N celdillas clasificando en M clases. Sobre las columnas se ordenan las clases reales y sobre las filas las unidades cartográficas. Los elementos que aparecen en la diagonal nos indican el número de clasificación realizadas correctamente y aquellos que aparecen fuera suponen migraciones o fugas. (Muñoz, 2016). Se obtuvo a partir de muestras que confirman las coordenadas del municipio con 90 puntos por categoría. El muestreo es crucial porque una representación precisa y detallada del área de estudio, con ellos garantizar que los datos recopilados sean representativos del área total, lo que permite el análisis preciso y fiables. Con la herramienta de post-clasificación esencial para validar los resultados obtenidos de una clasificación previa. Esta matriz permitió comparar los datos de la clasificación realizada con valores observados o de referencia, facilitando la evaluación de la precisión y fiabilidad de los resultados.

A través de esta comparación, es posible identificar aciertos y errores en las categorías clasificadas, proporcionando una medida cuantitativa de la exactitud del modelo de clasificación (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz de porcentaje obtenida de la matriz de confusión

RASTER_ VALU	Z.E	C.A	Z.A	C.M	Z.G	TOTAL	EXACTITUD DE USUARIO	ERROR DE COMISIÓN
Z.E	25	0	6	0	3	34	73.53	26.47
C.A	0	50	0	0	0	50	100	0
Z.A	5	0	42	0	0	47	89.39	10.64
C.M	11	0	3	51	1	66	77.27	22.73
Z.G	0	0	0	0	47	47	100	0
TOTAL	41	50	51	51	51	244	88.11	
EXACTITUD DEL PRODUCTO	61	100	82	100	92	435		
ERROR DE OMISIÓN	39	0	18	0	8			

Z.E=Zonas erosionadas; C.A=Cuerpo de agua; Z.A=Zonas agrícolas; C.M=Cultivo de mango; Z.G.=Zona ganadera.

Resultados y Discusión

Análisis de la clasificación supervisada a partir del análisis de la matriz de confusión. Teniendo los valores por la clasificación en cuenta a la matriz de confusión (Tabla 2), se determinó la confiabilidad de la clasificación en la Tabla 2 se evidencia los verdaderos positivos (TP), verdadero negativo (TN), falsos positivos (FP) y los falsos negativos (FN) mostradas con sus siglas en inglés (Tabla 3).

Tabla 2. Matriz de porcentaje obtenida de la matriz de confusión

RASTER_ VALU	ZONAS EROSIONADAS	CUERPOS DE AGUA	ZONAS AGRÍCOLAS	CULTIVO DE MANGO	ZONAS GANADERAS
ZONAS EROSIONADAS	10.25%	0%	2.46%	0%	1.23%
CUERPOS DE AGUA	0%	20.49%	0%	0%	0%
ZONAS AGRÍCOLAS	2.05%	0%	17.21%	0%	0%
CULTIVO DE MANGO	4.51%	0%	1.23%	20.90%	0.41%
ZONAS GANADERAS	0%	0%	0%	0%	219.26%

Tabla 3. Variable que determinan la confiabilidad de la clasificación supervisada

CLASES	TP	TN	FP	FN
ZONAS EROSIONADAS	10.25%	79.5%	7.01%	3.69%
CUERPOS DE AGUA	20.49%	79.51%	0%	0%
ZONAS AGRICOLAS	17.21%	77.05%	3.69%	2.05%
CULTIVO DE MANGO	20.9%	72.95%	0%	6.15%
ZONAS GANADERAS	19.26%	79.1%	1.64%	0%

TP=Verdaderos positivos; TN=Verdaderos negativos; FP=Falsos positivos; FN=Falsos negativos

El Tabla 3 de la clasificación muestra el desempeño del modelo en la identificación de diferentes tipos de terreno. Para las Zonas Erosionadas, el modelo acertó en muchos casos, identificando correctamente varias las áreas erosionadas y no erosionadas, aunque hubo errores al clasificar incorrectamente algunas áreas como erosionadas cuando no lo eran y al no reconocer otras el modelo se desempeña de forma sobresaliente.

En los cuerpos de agua, modelo demostró una precisión perfecta, identificando todos los casos sin errores; Las zonas agrícolas mostraron un buen rendimiento, con la mayoría de los casos correctamente identificados, aunque también con algunos errores en la clasificación similares al caso de las zonas erosionadas. Para los cultivos de mango se identificado correctamente la mayoría de los casos, pero hubo algunos cultivos que no fueron detectados. Finalmente, en las zonas ganaderas, el modelo mostro alta precisión, con una gran mayoría de los casos correctamente identificados y muy pocos errores.

El modelo de clasificación permite identificar correctamente diferentes tipos de terrenos usando cuatro métricas, sensibilidad, especificidad, exactitud y precisión (Tabla 4). La sensibilidad mide la capacidad del modelo para detectar correctamente casos positivos en cada categoría; los valores más altos en esta métrica, como el 100 % para los cuerpos de agua y zonas ganaderas, indican una detección perfecta. La especificidad refleja la precisión al identificar correctamente los casos negativos, siendo también del 100 % para cuerpos de agua y cultivos de mango, lo que significó que no hubo falsos positivos. La exactitud indico la proporción total de predicciones correctas con el 100% para cuerpos de agua y altos valores en otras categorías, lo que sugiere una alta fiabilidad del modelo. Finalmente, la precisión muestra cuantos de los cosos predichos como positivos realmente lo son destacándose el 100% para cuerpos de agua y cultivo de mango, lo que indico una clasificación sin errores en esta área.

Tabla 4. Indicadores de rendimiento de la clasificación en diferentes zonas

Descripción	Zonas erosionadas	Cuerpos De Agua	Zonas agrícolas	Cultivo De Mango	Zonas ganaderas
Sensibilidad	73.53%	100%	89.36%	77.26%	100%
Especificidad	91.90%	100%	95.43%	100%	97.97%
Exactitud	89.35%	100%	94.26%	93.85%	98.36%
Precisión	59.39%	100%	82.34%	100%	92.15%

Análisis cartográfico

Durante el análisis se realizó un mapa del municipio de santo domingo Zanatepec, el mapa representa una clasificación supervisada de las actividades y uso del suelo utilizando imágenes satelitales del año 2023. La proyección es UTM con Datum Horizontal WGS-1987, ubicada en la Zona 16 Norte y con una escala de 1:380,000. La clasificación tiene una precisión total del 88.11% basada en una matriz de confusión, lo que indica un alto grado de fiabilidad en los datos presentados. También se realizó una clasificación exhaustiva de los divertidos tipos de usos del suelo, y se detalló la superficie en hectáreas(ha) (Figura 3).

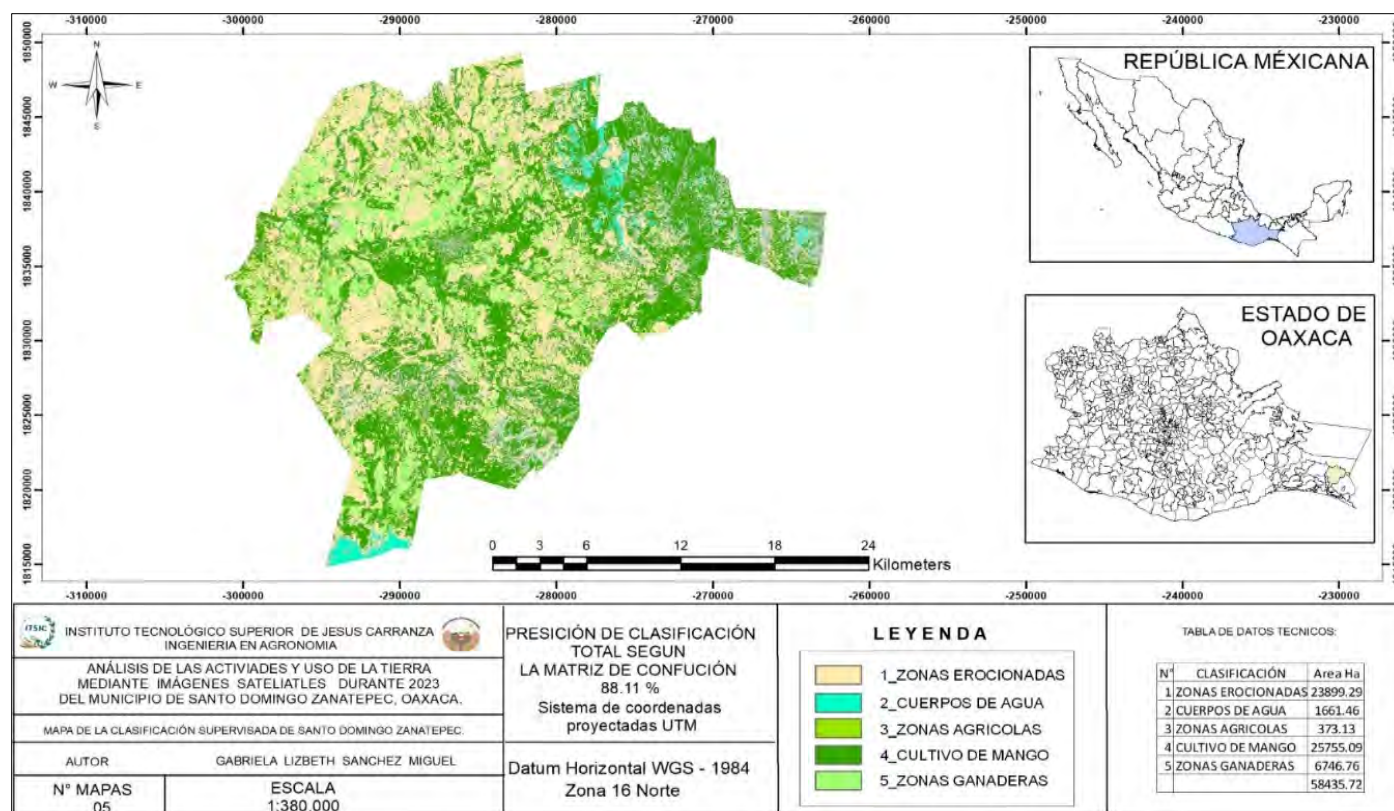


Figura 3. Mapa del cambio del uso del suelo en el municipio de Santos Domingo Zanatepec, Oaxaca

En las zonas erosionadas representan una gran parte del terreno con 23,899.29 hectáreas; La erosión del suelo es un problema significativo, ya que afecta la fertilidad y la estructura del suelo, lo que a su vez impacta la agricultura y el medio ambiente; Al identificar estas áreas permite a las autoridades y a los agricultores implementar prácticas de conservación de suelo, como la reforestación, el uso de cobertura vegetal y la construcción de terrazas para reducir la velocidad del agua de escorrentía.

Los cuerpos de agua abarcan 1,661.46 hectáreas del terreno. Estos incluyen ríos, lagos, estanques y otras fuentes de agua superficiales que son vitales para el ecosistema local, la agricultura y el suministro del agua para las comunidades; Las zonas agrícolas se comprenden 373,13 hectáreas, son áreas dedicadas a la producción de maíz, sandía, calabaza, melón, pepino y el sorgo la agricultura es un pilar de la economía local y proporciona alimentos tanto para el consumo interno como para la comercialización. La identificación precisa de estas reas permite planificar y gestionar de manera eficiente las prácticas agrícolas, promoviendo la rotación de cultivos, el uso de fertilizantes orgánicos y la adaptación de técnicas agrícolas sostenibles.

El cultivo de mango es prominente en la región, con 25,755.09 hectáreas dedicadas a estas actividades. El mango es un cultivo de alto valor que no solo es importante para la economía local, sino que también tiene un mercado de exportación significativo. Con la identificación de estas áreas de cultivo, pueden implementar estrategias de manejo integrado de plagas y mejorar las técnicas de riego para aumentar la eficiencia y la calidad de la producción; Cuanta también con zonas ganaderas que abarcan 6,746.76 hectáreas y son áreas destinadas a la cría de ganado, la ganadería es una actividad económica clave que proporciona productos como carne, leche, y cuero.

Conclusiones

El uso de imágenes satelitales para representar la distribución de las áreas forestales, agrícolas, ganaderas, cuerpos de agua y las huertas de mango en el municipio de Santo Domingo Zanatepec, Oaxaca, ofrece una herramienta poderosa para la planificación y gestión ambiental. Este análisis destacó la importancia de la teledetección como herramientas clave para una gestión eficiente del territorio.

La integración de datos geoespaciales y el análisis remoto resulta esencial para la planificación sostenible, ya que permite mitigar impactos ambientales, conservar recursos naturales y mejorar prácticas agrícolas y ganaderas.

Agradecimientos y financiamiento: Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto, así como por el acompañamiento y asesoría recibida durante todo el proceso académico. Asimismo, extendiendo un profundo reconocimiento a Geo-Soluciones por su valioso apoyo, recursos y orientación técnica, que fueron fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.

Bibliografía

- Amézquita Becerra, G., & Pérez Castillo, J. N. (2009). Servicio grid para la clasificación no supervisada de imágenes satelitales utilizando autómatas celulares. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 19(2), 59–76. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-81702009000200005&script=sci_arttext
- Gamarra Agama, S. E. (2017). *Análisis de la cobertura y uso de la tierra utilizando imágenes de resolución espacial media para el distrito de San Ramón–Chanchamayo–Junín–Perú* [Tesis de licenciatura]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3292>
- Muñoz, J. M. S. (2016). Análisis de calidad cartográfica mediante el estudio de la matriz de confusión. *Pensamiento Matemático*, 6(2), 9–26. https://revista.giepm.com/wp-content/uploads/revista_impresa/vol_VI_num_2/inv_calidad_carto.pdf
- Navarro Córdova, E. J. (2018). *Análisis de cambios de cobertura y uso de la tierra con imágenes satelitales del distrito de Eduardo Villanueva, periodos 1992–2003–2016* [Tesis de licenciatura]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/2600>
- Paucar Pongo, J. C. (2024). *Aplicación del software ArcGIS para la ubicación y elaboración de mapas para un relleno sanitario en el distrito de Ilave–Puno, 2023* [Tesis de licenciatura]. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/790>
- Robles, J. F. C. (2007). *Extracción de mapas temáticos a partir de la clasificación en imágenes satelitales* [Tesis doctoral, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica]. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/2243>
- Villatoro, B. (2021). Uso de índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes satelitales Sentinel-2 y Landsat 8 para monitoreo de humedad, como indicador de momento óptimo de cosecha en caña de azúcar. En *CENGICAÑA*. <http://es.scribd.com/document/921422647/Indices-de-Vegetacion-Ndwi-y-Msi>
- Zhang, T., Su, J., Xu, Z., Luo, Y., & Li, J. (2021). Sentinel-2 satellite imagery for urban land cover classification by optimized random forest classifier. *Applied Sciences*, 11(2), 543. <https://doi.org/10.3390/app11020543>

Electropolimerización de EDOT y 5-amino-1,10-fenantrolina en DES para la modificación de sensores electroquímicos

Estefania Godoy-Colin ^{1,2,*}, Adrián López-Yáñez ^{1,2}, Gastón Martínez-De Jesús ¹, Silvia Corona-Avendaño ² y Manuel Palomar-Pardavé ²

¹ División de Ingeniería Química y Bioquímica, TecNM/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N, Ecatepec 55210, Estado de México, México

² Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Ciudad de México, México

* Estefania Godoy Colin: al2193803826@azc.uam.mx; Tel.: 7731565877

Desarrollo Sustentable (Materiales Sustentables)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 7 de octubre de 2025

Publicado: 2 de marzo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.621>

Resumen: La modificación de electrodos con polímeros conductores sintetizados por electropolimerización en disolventes eutécticos profundos (DES por sus siglas en inglés) representa una estrategia prometedora para el desarrollo de sensores electroquímicos. Es por ello, que en este trabajo se modificó la superficie de un electrodo de carbón vítreo (GCE) con el polímero de la molécula 3,4 etilendioxinofeno (EDOT) para formar PEDOT o de la molécula 5-amino-1,10-fenantrolina (5Aphen) para formar Poly5Aphen, a partir de un disolvente eutéctico profundo a base de cloruro de colina y urea (reline). Los resultados obtenidos por voltamperometría cíclica (VC) mostraron que es posible polimerizar EDOT y 5Aphen sobre la superficie del GCE al emplear un DES. Por otro lado, con la técnica de caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) y Espectroscopia de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS), se realizó un análisis microestructural y morfológico, así como un análisis elemental del electrodo GCE modificado con PEDOT y Poly5Aphen, que sugieren una electrodeposición homogénea del polímero conductor sobre el electrodo GCE. Además de que fue posible incrementar el área electroactiva del electrodo de GCE modificado con los polímeros conductores (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen) con respecto al electrodo GCE desnudo.

Palabras clave: Electropolimerización, Disolventes Eutécticos Profundos, PEDOT, Poly5Aphen, Electrodo Carbón Vítreo

Electropolymerization of EDOT and 5-amino-1,10-phenanthroline in DES for the modification of electrochemical sensors

Abstract: The modification of electrodes with conducting polymers synthesized by electropolymerization in deep eutectic solvents (DES) represents a promising strategy for the development of electrochemical sensors. Therefore, in this work, the surface of a glassy carbon electrode (GCE) was modified with the polymer of the molecule 3,4-ethylenedioxyphenol (EDOT) to form PEDOT or the molecule 5-amino-1,10-phenanthroline (5Aphen) to form Poly5Aphen, starting from a deep eutectic solvent based on choline chloride and urea (reline). The results obtained by cyclic voltammetry (CV) showed that it is possible to polymerize EDOT and 5Aphen on the surface of the GCE using a DES. On the other hand, using the Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) characterization techniques, a microstructural and morphological analysis, as well as an elemental analysis of the GCE electrode modified with PEDOT and Poly5Aphen, was performed, which suggested a homogeneous electrodeposition of the conductive polymer on the GCE electrode. In addition, it was possible to increase the electroactive area of the GCE electrode modified with the conductive polymers (GCE/PEDOT and GCE/Poly5Aphen) with respect to the bare GCE electrode.

Keywords: Electropolymerization, Deep eutectic solvents, PEDOT, Poly5Aphen, Glassy Carbon Electrode

Introducción

La modificación de electrodos con polímeros conductores (PCs) a partir de técnicas electroquímicas se ha consolidado como una estrategia versátil para diseñar superficies con alta área electroactiva, cinética de transferencia de carga favorable y selectividad química ajustable, todas ellas propiedades cruciales en sensores electroquímicos dirigidos a analitos biológicamente relevantes como la dopamina (DA). En este contexto, el empleo de disolventes eutécticos profundos (deep eutectic solvents, DES) como medio de electrosíntesis ha emergido como alternativa “verde” y funcional a los solventes orgánicos y a los líquidos iónicos, al ofrecer baja volatilidad y toxicidad, ventanas electroquímicas amplias, elevada solubilidad para monómeros y sales, y microambientes iónicos capaces de modular la nucleación, crecimiento y dopaje de películas poliméricas (Roda *et al.*, 2019; Brett, 2024; Urvika *et al.*, 2025). Dichas características permiten obtener recubrimientos con morfología y propiedades electroquímicas mejoradas,

incrementando sensibilidad y estabilidad en plataformas de sensado. En particular, se ha demostrado que la electropolimerización en DES favorece el control de espesor, rugosidad y conductividad de la película, con impactos directos en el límite de detección y la resolución voltamétrica frente a interferentes como ácido ascórbico y ácido úrico, típicamente presentes en matrices fisiológicas (Nahar *et al.*, 2021; Nam *et al.*, 2023; Brett, 2024).

Entre los monómeros de mayor interés, el 3,4-etilendioxitiofeno (EDOT) es un estándar de referencia para generar poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT), un polímero tipo p con alta conductividad y biocompatibilidad. El uso de DES por ejemplo, etalina como medio de polimerización de EDOT ha permitido, desde los primeros reportes, fabricar electrodos PEDOT con mayor sensibilidad y respuesta analítica en comparación con medios acuosos u orgánicos convencionales, abriendo camino a sensores robustos de fenoles, catecoles y neurotransmisores (Prathish *et al.*, 2014). En la última década, PEDOT y sus híbridos (p. ej., PEDOT-PPy o PEDOT:PSS sobre carbones nanoestructurados) han mostrado detección de DA a niveles nano-/micromolares, con ventanas lineales amplias, buena reproducibilidad y selectividad frente a interferencias redox co-existentes (Kao *et al.*, 2024; Makaluza *et al.*, 2025; Sanmugam *et al.*, 2025). Estos avances se explican por la elevada densidad de sitios activos, la conductividad de la película dopada y la compatibilidad del polímero con estrategias de funcionalización superficial que facilitan la preconcentración y reconocimiento (Chen *et al.*, 2024; Khan *et al.*, 2024).

De forma complementaria, los polímeros derivados de 5-amino-1,10-fenantrolina (5Aphen) constituyen una familia menos explorada pero prometedora. La 5Aphen, ya sea libre o como ligando en complejos de Fe(II)/Ru(II), se electropolimeriza sobre sustratos de carbono y metales generando películas redox-activas y conductoras; su capacidad fenantrolínica aporta sitios quelantes y centros mediadores que pueden promover la transferencia electrónica, relevantes para la discriminación de catecolaminas (Bachas *et al.*, 1997; Cobos-Murcia *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2011; Brown *et al.*, 2020). Por lo tanto, la electropolimerización de 5Aphen en DES surge como una ruta viable que combina un microentorno iónico con la química de coordinación del polímero, con el objetivo de maximizar la sensibilidad y selectividad hacia la DA en presencia de ácido ascórbico y ácido úrico (Meng *et al.*, 2021; Sanmugam *et al.*, 2025).

Por ello, en este trabajo se modificó electroquímicamente un electrodo de carbono vítreo (GCE) con el polímero de la molécula 3,4 etilendioxinofeno (EDOT) para formar PEDOT y de la molécula 5-amino-1,10-fenantrolina (5Aphen) para formar Poly5Aphen a partir de un DES y su potencial aplicación como agentes modificantes de sensores electroquímicos en la detección de moléculas orgánicas de interés biológico como la dopamina.

Materiales y Métodos

Preparación del DES

La preparación del DES (Relina) consiste en una mezcla de Cloruro de Colina (Sigma-Aldrich, pureza $\geq 98\%$) y Urea (Sigma-Aldrich, pureza $\geq 98\%$) en una relación molar 1:2 para obtener un volumen final de 60 mL. La mezcla se mantiene en agitación constante durante 2 horas a 60 °C hasta obtener un líquido transparente y homogéneo. Finalmente, la mezcla se deja enfriar a temperatura ambiente.

Modificación del electrodo GCE con PEDOT (GCE/PEDOT)

La electropolimerización del EDOT (PEDOT) sobre la superficie del electrodo de carbón vítreo (GCE) se realizó siguiendo la metodología y condiciones experimentales propuestas por Prathish *et al.* (2014; 2016), la cual consiste en ciclar periódicamente el PC sobre un GCE utilizando una disolución 10 mM de EDOT a partir del DES en presencia de 4 M de HClO₄ mediante la técnica de voltamperometría cíclica (VC). Para ello, se empleó una celda convencional de tres electrodos: un alambre de plata como electrodo de pseudoreferencia (QRE), una barra de grafito como contraelectrodo (CE) y un electrodo de carbón vítreo (GCE) como electrodo de trabajo (WE). Las pruebas de VC se realizaron en un intervalo de potencial de -0.6 a 1.0 V a una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ durante 15 ciclos. Se evaluó la sensibilidad del PEDOT como sustrato para la detección de ácido ascórbico (AA) a partir de la electropolimerización del EDOT en diferentes mezclas eutécticas, incluida la relina (Prathish *et al.*, 2014).

Modificación del electrodo GCE con Poly5Aphen (GCE/Poly5Aphen)

La electropolimerización de la 5Aphen para formar Poly5Aphen sobre la superficie del GCE, consistió en aplicar una metodología similar a la empleada en la electropolimerización del EDOT. El método consistió en ciclar periódicamente la 5Aphen sobre el GCE mediante VC a 60 °C para el sistema GCE/5Aphen (1 mM) en DES. Para ello, se empleó una celda convencional de tres electrodos: un alambre de plata como electrodo de pseudoreferencia (QRE), una barra de grafito como contraelectrodo (CE) y un electrodo de carbón vítreo (GCE) como electrodo de trabajo (WE). La electropolimerización por VC se realizó en un intervalo de potencial de -1.5 a 1.8 V a una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ durante 10 ciclos. Debido a la limitada investigación con respecto a la electropolimerización de la 5Aphen, las condiciones anteriores se eligieron tomando como referencia la investigación de Cobos-Murcia *et al.* (2005) para la electropolimerización de la 5Aphen sobre diferentes sustratos a partir de un medio acuoso.

Cálculo del Área Electroactiva

El cálculo del área real electroactiva del electrodo GCE desnudo y de los electrodos modificados con el PC (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen) empleando las técnicas de VC y cronoamperometría (CA) se llevó a cabo en una celda electroquímica de tres electrodos y 25 mL de una disolución 4 mM de Hexacianoferrato (III) de Potasio o Ferricianuro de Potasio (K₃Fe(CN)₆). En el estudio potenciodinámico se consideró una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ en un intervalo de potencial de -1.0 a 1.2 mV en sentido catódico con un potencial de inicio de 1.2 mV, tanto para el electrodo GCE desnudo como para los electrodos modificados (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen). Mientras que para el estudio potencioestático se aplicó un potencial de 105 mV para el GCE desnudo, 194 mV para el electrodo GCE/Poly5Aphen y 106 mV para el electrodo GCE/PEDOT, con una duración de 60 segundos en todos los casos.

Resultados y Discusión

En la Figura 1 se muestra el voltamperograma del blanco, correspondiente al GCE desnudo de una muestra a 60 °C de DES puro o en ausencia del monómero. Como se puede observar, solo se registran las corrientes capacitivas del electrodo empleado. Por lo que se asegura que las señales obtenidas por VC tras la electrosíntesis del PC sobre la superficie del GCE corresponden únicamente a las señales conductoras del polímero y no a las del propio GCE y/o del medio electrolítico, como se muestra en las siguientes figuras.

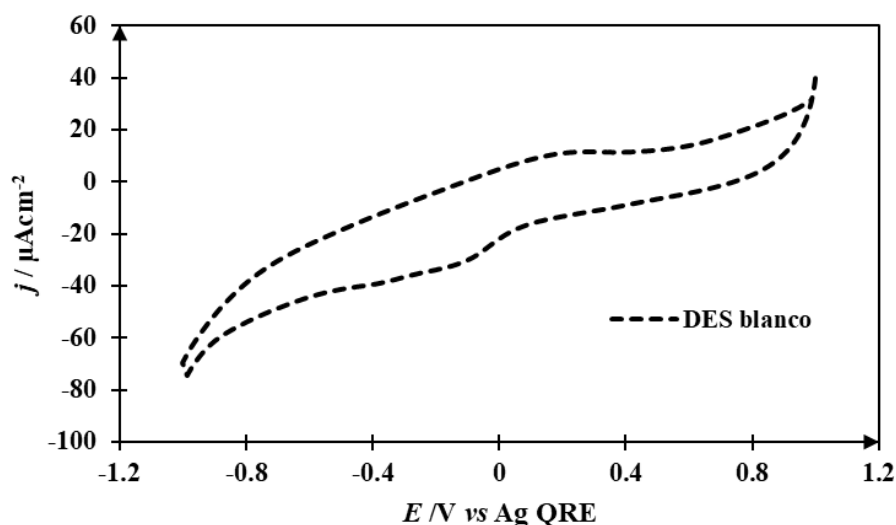


Figura 1. VC correspondiente al GCE desnudo en DES puro a 60 °C (blanco) en un intervalo de potencial de -1.0 a 1.0 V en sentido anódico a una velocidad de barrido de 50 mVs⁻¹.

Las Figuras 2 y 3 muestran la respuesta voltamperométrica registrada durante la electropolimerización de EDOT y 5Aphen sobre la superficie del GCE, respectivamente. Los voltamperogramas cíclicos de la Figura 2 y 3 en comparación con el voltamperograma correspondiente al GCE sin modificar en DES puro (ver Figura 1), demuestran que los máximos

y mínimos presentes en la Figura 2 y 3 son señales asociadas únicamente a la oxidación y reducción en el proceso de electropolimerización del EDOT y 5Aphen sobre la superficie del electrodo.

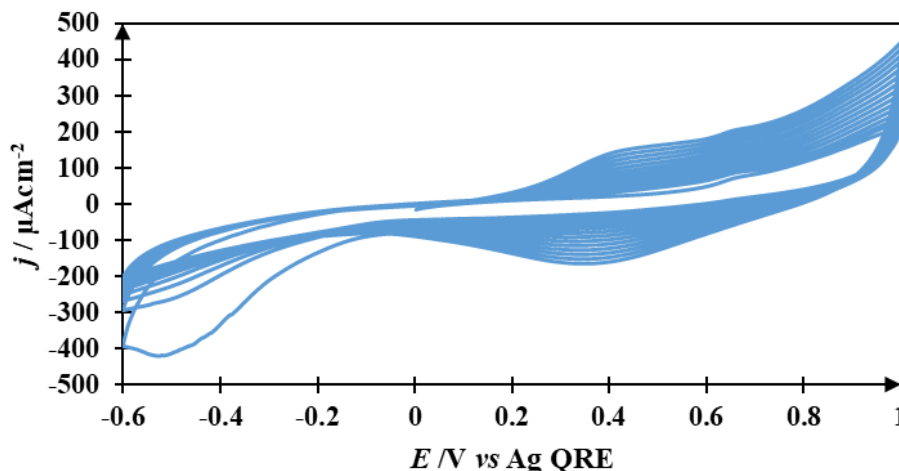


Figura 2. VCs (15 ciclos) obtenidos a 60 °C en el sistema GCE/10 mM de EDOT, 4 M de HClO₄ en DES. A una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ y con un potencial de inicio de 0.0 V en sentido anódico.

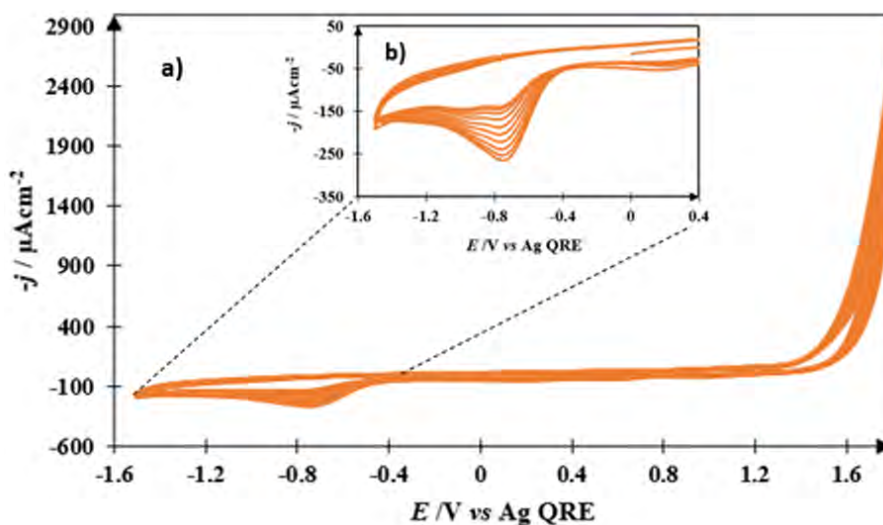


Figura 3. a) VCs (10 ciclos) obtenidos a 60 °C en el sistema GCE/ 1 mM de 5Aphen en DES. A una velocidad de barrido de potencial de 50 mVs⁻¹ y con un potencial de inicio de 0.0 V en sentido anódico. b) acercamiento de la zona de reducción del VC mostrado en el inciso a).

Asimismo, con la Figura 2 y 3 se puede observar que tanto en la electropolimerización de EDOT como de 5Aphen, la corriente de pico (i_p) incrementa conforme aumenta el número de ciclos, lo cual es un comportamiento típico en la formación de PCs (Prathish *et al.*, 2014; Brett, 2024), debido a que con cada ciclo de barrido de potencial aplicado se promueve la formación de nuevas capas del PC sobre las capas ya formadas en la superficie del GCE con los ciclos anteriores, lo que consecuentemente se verá reflejado en un incremento de la corriente y de la carga Q acumulada tanto en la zona anódica como en la zona catódica. Por otro lado, los resultados del área real electroactiva del electrodo GCE desnudo y de los electrodos modificados (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen) se obtuvieron mediante VC y CA en un sistema de Hexacianoferrato (III) de potasio a 25 °C. En el caso de la determinación por VC, se empleó la Ecuación 1 de Randles-Sevcik. Mientras que la determinación por CA, se empleó la Ecuación 2 o ecuación de Cottrell.

$$i_p = (2.39 \times 10^{-5}) n^{3/2} A D^{1/2} C^* v^{1/2} \quad (1)$$

$$i_p = ((z F A D^{1/2} C) / \pi^{1/2}) (t^{-1/2}) \quad (2)$$

Donde: A_r es el área real electroactiva (cm^2), Z o n es el número de electrones intercambiados, F es la Constante de Faraday (C/mol), D es el coeficiente de difusión (cm^2/s), C es concentración (mol/cm^3), t es el tiempo (s), i_p es la corriente de pico (A) y v es la velocidad de barrido de potencial (V/s).

La Ecuación 1 puede resolverse por diferentes métodos en donde finalmente se obtiene una relación en la corriente máxima alcanzada anódica o catódica, (i_p) es proporcional a C^* y $v^{1/2}$. Y de la cual podemos despegar la A_r como se muestra en la Ecuación 3, que también se le conoce como la ecuación de Randles-Sevcik.

$$A_r = i_p / ((2.69 \times 10^5) * n^{\frac{3}{2}} * D^{\frac{1}{2}} * C * v^{1/2}) \quad (3)$$

Para la determinación del A_r electroactiva por CA se fijó el potencial inicial con el valor de potencial al cual se obtuvo toda la reducción del Hexacianoferrato (III) de Potasio en la prueba de VC, es decir, el potencial asociado a la corriente de pico (i_p) catódico. A partir de los resultados del CA, se graficó la corriente en función de $t^{1/2}$ y se obtuvieron líneas rectas que se ajustan a la ecuación de Cottrell (Ecuación 2) de cuya pendiente se puede despejar el área real electroactiva, tal y como se muestra en la Ecuación 4.

$$A_r = (m * \pi^{\frac{1}{2}}) / (zFD^{1/2}C) \quad (4)$$

Por lo tanto, a partir de la Ecuación 3 y 4 se obtuvo el área real electroactiva (A_r) para cada uno de los electrodos estudiados los cuales se resumen en la Tabla 1 considerando un área geométrica (A_g) de 0.1963 cm^2 , número de electrones intercambiados $Z=1$, un coeficiente de difusión del hexacianoferrato (III) de potasio $D=7.6\text{E-}6 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ y una velocidad de barrido de potencial de 0.05 Vs^{-1} .

La Tabla 1 muestra los resultados del área real electroactiva del electrodo GCE desnudo y de los electrodos modificados (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen). En donde se puede ver que el área electroactiva incremento ligeramente en ambos electrodos modificados con respecto al electrodo GCE desnudo. Sin embargo, esto abre la oportunidad de explorar en estudios futuros la integración de la electropolimerización de PCs y electrodeósitos de nanopartículas metálicas (MNPs) para mejorar el área electroactiva de los sensores electroquímicos.

Tabla 1. Comparación de los Valores del Área Real Electroactiva, A_r

Electrodo/Sustrato	Método Aplicado	A_r reportada (cm^2)	Referencia
GCE modificado con PEDOT	Ecuación de Randles–Sevcik (VC) y Cottrell (CA) en una solución de ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$).	GCE desnudo: 520 (VC) y 0.549 (CA) & CGE/PEDOT: 533 (VC) y 0.553 (CA)	Este trabajo
GCE modificado con Poly5Aphen	Ecuación de Randles–Sevcik (VC) y Cottrell (CA) en una solución de ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$).	GCE desnudo: 520 (VC) y 0.549 (CA) & CGE/Poly5Aphen: 654 (VC) y 0.554 (CA)	Este trabajo
GCE modificado con Gr-PEDOT: PSS nanocomposite	Ecuación de Randles–Sevcik con par ferro/ferricianuro; escaneos de VC a varios scan rates.	GCE desnudo: 0.1008 & GCE/Gr-PEDOT: PSS: 0.675	Makaluza <i>et al.</i> , 2025
GCE modificado con PEDOT + esferas de carbón	Ecuación de Randles–Sevcik con par ferro/ferricianuro; relación i_p vs. $v^{1/2}$	PEDOT/carbon sphere/GCE: 0.470	Ma <i>et al.</i> , 2025
GCE vs GCE/PEDOT: PSS	Randles–Sevcik; VC en solución de $\text{Fe}(\text{CN})_6$ en KCl; diferentes scan rates.	GCE: 0.106 & GCE/PEDOT: PSS: 0.250	Hossain <i>et al.</i> , 2023

Finalmente, con el fin de comprobar que el GCE desnudo fue modificado con los PCs a partir del DES, se realizó un análisis microestructural y morfológico, así como un análisis elemental del electrodo GCE desnudo (ver Figura 4), en la Figura 5 se presenta el electrodo GCE después del proceso de electropolimerización de EDOT y en la Figura 6 el respectivo al GCE con la película de Poly5Aphen.

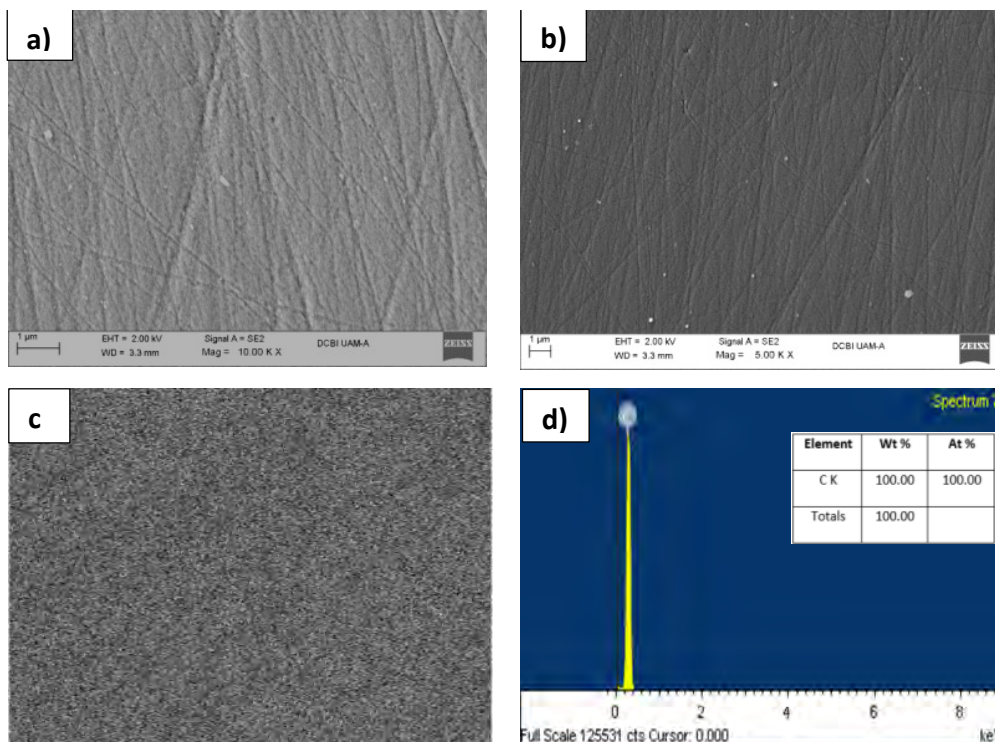


Figura 4. Micrografía obtenida por MEB a: a) 10.0 kX y b) 5.0 kX, c) Distribución elemental por mapeo y d) Espectro del análisis elemental mediante EDS correspondiente al electrodo GCE desnudo

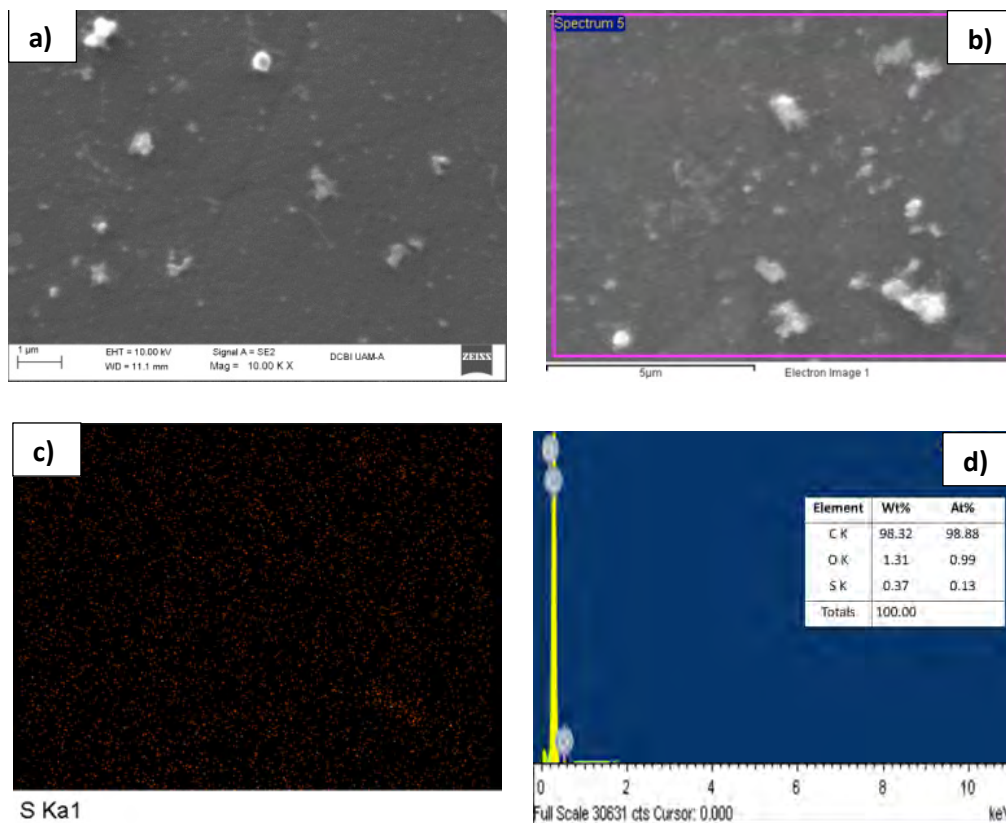


Figura 5. Micrografía obtenida por MEB a) 10.0 kX, b) Análisis por EDS sobre la superficie del electrodo GCE/PEDOT, c) distribución elemental por mapeo resaltando en color verde la distribución de S presente en el compuesto organosulfurado (tiofeno) presente en la cadena polimerica del PEDOT y d) Espectro del análisis elemental mediante EDS correspondiente al electrodo GCE/PEDOT

Los resultados mostrados en la Figura 5 correspondientes a la caracterización microestructural y análisis elemental por EDS y por mapeo sobre la superficie del electrodo GCE/PEDOT, se demostró la presencia de azufre (S), el cual forma parte del compuesto organosulfurado (tiofeno) presente en la cadena polimérica del PEDOT (ver Figura 5c y Figura 5d). Es importante resaltar que el análisis elemental por mapeo demostró también una distribución homogénea de S, lo cual podría sugerir una electrodeposición homogénea de PEDOT sobre la superficie del electrodo GCE/PEDOT (ver Figura 5d). Al comparar estos resultados con los obtenidos para el electrodo GCE desnudo (ver Figura 4) se puede demostrar que fue posible modificar la superficie del GCE con PEDOT utilizando un disolvente eutéctico.

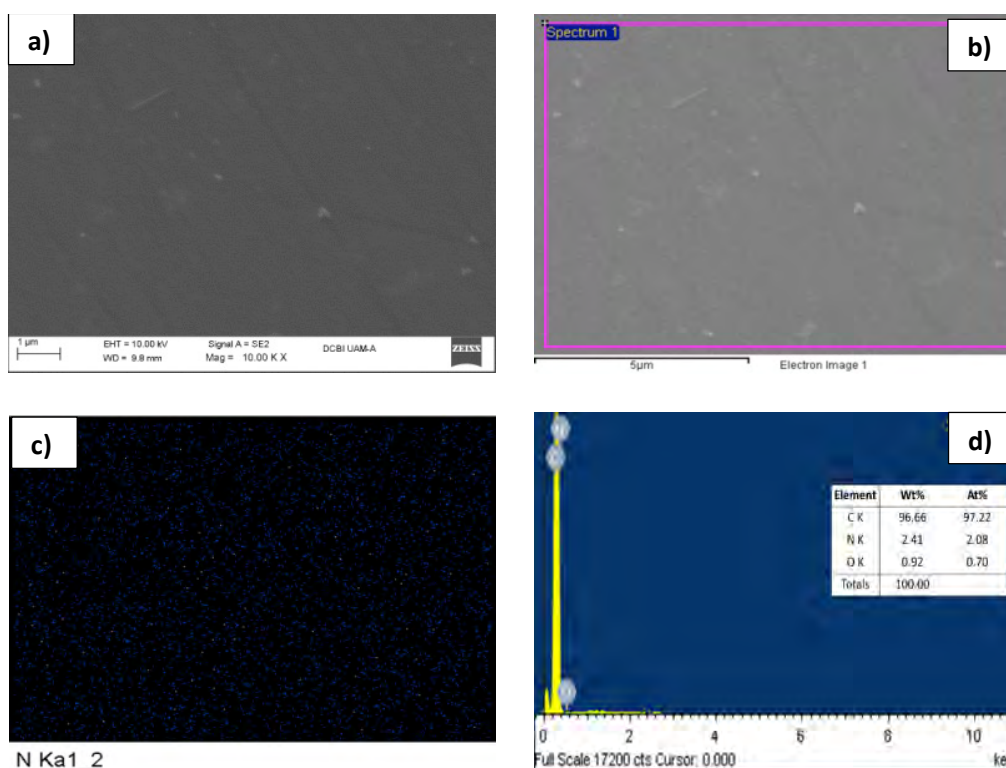


Figura 6. Micrografía obtenida por MEB a) 10.0 kX, b) Análisis por EDS sobre la superficie del electrodo GCE/Poly5Aphen, c) distribución elemental por mapeo resaltando en color azul la distribución de N de los grupos amino presentes en la cadena polimérica de la Poly5Aphen y d) Espectro del análisis elemental mediante EDS correspondiente al electrodo GCE/Poly5Aphen

Por otro lado, el análisis elemental por EDS y por mapeo sobre la superficie del electrodo GCE/Poly5Aphen, reveló la presencia de nitrógeno (N), el cual forma parte de los grupos amino presentes en la cadena polimérica de la Poly5Aphen (ver Figura 6c y Figura 6d). Es importante resaltar que el análisis elemental por mapeo demostró también una distribución homogénea de N, lo cual podría sugerir una electrodeposición homogénea de la Poly5Aphen sobre la superficie del electrodo GCE/Poly5Aphen (ver Figura 6d). Al comparar estos resultados con los obtenidos para el electrodo GCE desnudo (ver Figura 4), se puede demostrar que al igual que con el PEDOT, fue posible modificar la superficie del electrodo GCE con Poly5Aphen utilizando un DES.

En comparación con estudios previos de la electrosíntesis de PCs en medios acuosos (Cobos-Murcia *et al.*, 2005; Kao *et al.*, 2024; Makaluza *et al.*, 2025), los polímeros sintetizados en este trabajo a partir de un DES mostraron una electrodeposición más homogénea y un incremento moderado del área electroactiva con respecto al GCE desnudo. Asimismo, la obtención de Poly5Aphen sobre GCE se había estudiado únicamente en medio acuoso o solventes orgánicos (Bachas *et al.*, 1997; Cobos-Murcia *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2011), por lo que la electropolimerización de la 5Aphen en un DES no había sido reportada previamente, así como tampoco se había reportado el área electroactiva obtenida tras la modificación de un GCE con Poly5Aphen, demostrando que estos medios pueden favorecer la nucleación y dopaje uniforme de polímeros nitrogenados, lo que abre nuevas rutas para el diseño de sensores sustentables.

Además, los resultados del área electroactiva determinados en este trabajo tras la modificación del GCE con PEDOT o Poly5Aphen son consistentes con la literatura que emplea la ecuación de Randles-Sevcik para estimar el área a partir de VC en el par $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/^{4-}$. Por ejemplo, en un estudio sobre Gr-PEDOT:PSS nanocomposite, el área electroactiva subió desde 0.1008 cm^2 para el GCE desnudo hasta 0.6750 cm^2 tras la modificación (Makaluza *et al.*, 2025). En otro ejemplo con PEDOT-esferas de carbono, el área electroactiva reportado fue 0.478 cm^2 en GCE modificado, lo cual resalta el efecto de materiales carbonosos para aumentar la superficie activa (Ma *et al.*, 2025). También, un estudio clásico con GCE/PEDOT:PSS mostró un aumento desde 0.106 cm^2 hasta 0.257 cm^2 tras la modificación (Hossain *et al.*, 2023). Estos ejemplos indican que la magnitud del incremento depende fuertemente de la morfología de la película formada, la presencia de materiales con alta superficie (carbono, grafeno, etc.), la porosidad y los parámetros de electrodeposición. En este sentido, nuestro aporte específico incluye: (i) la electropolimerización homogénea de PEDOT y Poly5Aphen empleando un DES como la relina, lo cual puede favorecer uniformidad de recubrimiento; y (ii) aun cuando el incremento absoluto del área electroactiva en nuestro sistema sea moderado, la uniformidad de la electrodeposición en DES y la presencia del grupo amino en la Poly5Aphen constituyen aportes novedosos que pueden favorecer reproducibilidad y funcionalidad electroquímica del recubrimiento en aplicaciones de sensado. Además, subrayamos la importancia de reportar parámetros críticos (coeficiente de difusión usado, condiciones experimentales y método de cálculo) para permitir comparaciones cuantitativas entre trabajos.

Conclusiones

En este trabajo se demostró que es posible electropolimerizar de manera homogénea un PC como el PEDOT y la Poly5Aphen sobre un GCE mediante el uso de un DES. Además, se comprobó tanto por la ecuación de Randles-Sevcik y Cottrell que es posible incrementar el área electroactiva del electrodo GCE desnudo al modificarlo con los polímeros conductores (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen), lo cual abre una vía prometedora para estudios futuros en la fabricación de sensores electroquímicos de alto rendimiento para la detección de dopamina.

Limitaciones: en este trabajo no se realizaron pruebas para la detección de un analito de interés biológico como la dopamina (DA). Sin embargo, los resultados encontrados en este trabajo abren camino para nuevas investigaciones con respecto a la evaluación de la sensibilidad de los electrodos modificados (GCE/PEDOT y GCE/Poly5Aphen) en la detección de moléculas de interés biológico como neurotransmisores o inclusive fármacos. Así como en el uso de los DES como una alternativa sustentable de medio electrolítico en la modificación de sensores electroquímicos.

Agradecimientos y financiamiento: EGC agradece al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por el apoyo otorgado para la realización de una cátedra de investigación mediante el programa de Investigadoras e Investigadores COMECYT, al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE) y a la UAM-Azcapotzalco y al posgrado en Ciencias e Ingeniería de Materiales.

Bibliografía

- Bachas, L. G., Cullen, L., Hutchins, R. S., & Scott, D. L. (1997). Synthesis, characterization and electrochemical polymerization of eight transition-metal complexes of 5-amino-1,10-phenanthroline. *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, (9), 1571–1578. <https://doi.org/10.1039/A608468K>
- Brett, C. M. A. (2024). Perspectives for the use of deep eutectic solvents in the preparation of electrochemical sensors and biosensors. *Current Opinion in Electrochemistry*, 45, 101465. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2024.101465>
- Brown, K. L., Hou, X., Banks, O., Krueger, K. A., Hinson, J., Peaslee, G. F., DeYoung, P. A., Alger, S. M., Benzer, J., & Neils, T. L. (2011). Characterization of tris(5-amino-1,10-phenanthroline) ruthenium (II/III) polymer films using cyclic voltammetry and Rutherford backscattering spectrometry. *International Journal of Chemistry*, 3(4), 12–23. <https://doi.org/10.5539/ijc.v3n4p12>
- Brown, K. L., Danforth, R., Bleitz, E., Hwang, Y., & Rens, D. (2020). Cyclic voltammetric and spectroelectrochemical studies of tris(5-amino-1,10-phenanthroline) iron (II) polymer films. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(11), 10707–10721. <https://doi.org/10.20964/2020.11.66>
- Cobos-Murcia, J. A., Galicia, L., Rojas-Hernández, A., Ramírez-Silva, M. T., Álvarez-Bustamante, R. A., Romero-Romo, M., Rosquete-Pina, G., & Palomar-Pardavé, M. (2005). Electrochemical polymerisation of 5-amino-1,10-phenanthroline onto different substrates: Experimental and theoretical study. *Polymer*, 46(21), 9053–9063. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.07.026>
- Hossain, M. S., Khaleque, M. A., Ali, M. R., Bacchu, M. S., Hossain, M. I., Aly, S. A. M., & Khan, M. Z. H. (2023). Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): Polystyrene sulfonate-modified electrode for the detection of furosemide in pharmaceutical products. *ACS Omega*, 8(19), 16851–16858. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00463>
- Kao, T. Y., Kuo, C. H., Wu, Y. W., & Luo, S. C. (2024). Enhanced electrochemiluminescence detection of dopamine using antifouling PEDOT-modified SPEs for complex biological samples. *ACS Measurement Science Au*, 4(6), 712–720. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00053>

- Ma, L., Wang, Z., Liu, X., Xu, F., & Abdiryim, T. (2025). High sensitivity and selectivity of PEDOT/carbon sphere composites for Pb²⁺ detection. *Molecules*, 30(4), 798. <https://doi.org/10.3390/molecules30040798>
- Makaluza, S., Midzi, N., Olorundare, F. O. G., Zwane, B. N., Nkosi, D., & Arotiba, O. A. (2025). An electrochemical sensor for dopamine on a graphene–PEDOT:PSS hybrid ink nanoplatfrom. *SN Discover Applied Sciences*, 7, 694. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06694-y>
- Meng, S., Liu, Y., Wang, L., Ji, X., Chen, Y., Zheng, T., Yu, J., & Feng, H. (2021). Graphene-based flexible sensors for simultaneous detection of ascorbic acid, dopamine, and uric acid. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 726071. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.726071>
- Nahar, Y., & Thickett, S. C. (2021). Greener, faster, stronger: The benefits of deep eutectic solvents in polymer and materials science. *Polymers*, 13(3), 447. <https://doi.org/10.3390/polym13030447>
- Nam, N. N., Do, H. D. K., Trinh, K. T. L., & Lee, N. Y. (2023). Design strategy and application of deep eutectic solvents for green synthesis of nanomaterials. *Nanomaterials*, 13(7), 1164. <https://doi.org/10.3390/nano13071164>
- Prathish, K. P., Carvalho, R. C., & Brett, C. M. A. (2014). Highly sensitive poly(3,4-ethylenedioxythiophene) modified electrodes by electropolymerisation in deep eutectic solvents. *Surface and Coatings Technology*, 251, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2014.03.026>
- Prathish, K. P., Carvalho, R. C., & Brett, C. M. A. (2016). Electrochemical characterisation of poly(3,4-ethylenedioxythiophene) film modified glassy carbon electrodes prepared in deep eutectic solvents for simultaneous sensing of biomarkers. *Electrochimica Acta*, 187, 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.11.092>
- Roda, A., Matias, A. A., Paiva, A., & Duarte, A. R. C. (2019). Polymer science and engineering using deep eutectic solvents. *Polymers*, 11(5), 912. <https://doi.org/10.3390/polym11050912>
- Sanmugam, A., Vanitha, C., Almansour, A. I., Karuppasamy, K., Maiyalagan, T., Kim, H.-S., Vikraman, D., & Alfantazi, A. (2025). Unveiling the PEDOT–polypyrrole hybrid electrode for the electrochemical sensing of dopamine. *Scientific Reports*, 14, 10989. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82355-1>
- Urvika, Gaba, R., & Kataria, R. (2025). Deep eutectic solvents: Fundamentals and applications. En *Deep Eutectic Solvents* (ACS Symposium Series, Vol. 1504, Cap. 1, pp. 1–29). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2025-1504.ch001>

Evaluación del líquido iónico acetato de etanolamina en la producción de metano utilizando como sustrato hidrolizados enzimáticos de bagazo de *Agave tequilana* var. *azul*

Raúl Snell-Castro ^{1,*}, Jhovana Lizeth Lozano-López ¹, Hugo Oscar Méndez-Acosta ¹, José Antonio Pérez-Pimienta ² y Alma Toledo-Cervantes ¹

¹ Laboratorio Planta piloto, Departamento de Ingeniería Química, CUCEI-Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México.

² Laboratorio de biorrefinerías, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Nayarit, Tepic, México.

* Autor de correspondencia: raul.snell@academicos.udg.mx; Tel.: +52 33 13785900 ext. 27550.

Desarrollo Sustentable (Bioprocesos)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 22 de agosto de 2025

Publicado: 17 de marzo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.537>

Resumen: En este estudio se evaluó el efecto del líquido iónico acetato de etanolamina [EAO][OAc] durante la digestión anaerobia usando como sustrato, hidrolizados enzimáticos de bagazo de *Agave tequilana* var. *azul* (BATA) para la producción de metano utilizando valores óptimos obtenidos previamente usando como factores glucosa como sustrato modelo y el [EAO][OAc] con la metodología de la superficie de respuesta. Se realizaron pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM) usando como sustratos hidrolizados enzimáticos, hidrolizados enzimáticos con [EAO][OAc] y solo [EAO][OAc]. Los resultados indicaron que la máxima producción de metano fue obtenida a partir de los hidrolizados enzimáticos con [EAO][OAc] (2611 ± 107 NmL), evidenciándose que tanto las azúcares glucosa y xilosa como el acetato aportado por el [EAO][OAc] fueron asimilados y favorecieron la metanogénesis. En cuanto al rendimiento en la producción de metano, se observaron bajos rendimientos en los tratamientos que contenían [EAO][OAc], lo que podría indicar un fenómeno de inhibición de la simbiosis acetótrofa obligada donde participan bacterias acetógenas y arqueas acetótrofes para la producción de metano. En este contexto, el tratamiento de los hidrolizados enzimáticos con [EAO][OAc] y el tratamiento con solo [EAO][OAc] tuvieron una concentración final de acetato equivalente a 4.00 g/L y 5.75 g/L, respectivamente. Dado que esta simbiosis es inhibida por altas concentraciones de acetato, entonces la cantidad de acetato en estos tratamientos pudo colapsar esta vía de producción de metano, impactando negativamente ambos rendimientos.

Palabras clave: Producción de metano, líquido iónico, hidrolizados enzimáticos, bagazo de agave, digestión anaerobia

Evaluation of the ionic liquid ethanolamine acetate on methane production using enzymatic hydrolysates of *Agave tequilana* var. *azul* bagasse as substrate

Abstract: In this study, the effect of the ionic liquid ethanolamine acetate [EAO][OAc] during anaerobic digestion using enzymatic hydrolysates of *Agave tequilana* var. *azul* (BATA) bagasse as substrate for methane production was evaluated using optimal values previously obtained according to the response surface methodology, applying as factors glucose as a model substrate and [EAO][OAc]. Biochemical methane potential (BMP) tests were performed using enzymatic hydrolysates, enzymatic hydrolysates with [EAO][OAc] and only [EAO][OAc] as substrates. The results indicated that the maximum methane production was obtained from the enzymatic hydrolysates with [EAO][OAc] (2611 ± 107 NmL), demonstrating that both glucose and xylose contained in the hydrolysates as well as the acetate provided by [EAO][OAc] were assimilated and favored methanogenesis. Regarding the methane production yield, low yields were observed in the treatments containing [EAO][OAc], which could indicate an inhibition phenomenon of obligately-syntrophic acetate transfer where acetogenic bacteria and acetotrophic archaea participate for methane production. In this context, the treatment of the enzymatic hydrolysates with [EAO][OAc] and the treatment with only [EAO][OAc] had a final acetate concentration equivalent to 4.00 g/L and 5.75 g/L, respectively. Since this syntrophy is inhibited by high concentrations of acetate, then the amount of acetate in these treatments could collapse this methane production pathway, impacting negatively both methane yields.

Keywords: Methane production, ionic liquid, enzymatic hydrolysates, agave bagasse, anaerobic digestion

Introducción

La industria tequilera ha contribuido al desarrollo económico, agrícola e industrial en México, no obstante, durante la producción del tequila se genera un residuo sólido conocido como bagazo de agave. En este contexto, el Consejo Regulador de Tequila reporta en 2024 un consumo de 1.891 millones de toneladas de piña de *Agave Tequilana* var. *azul* para la producción de 495 millones de litros de tequila 40% v/v de alcohol (CRT, 2025). Si se considera que el 40% del peso seco de la piña se convierte en bagazo de agave (Cedeño-Cruz, 2003), entonces se puede inferir que se produjeron aproximadamente 756 miles de toneladas de bagazo de *Agave Tequilana* var. *azul* (BATA). Debido al gran

volumen de BATA generado y a la falta de tratamientos biológicos efectivos para su valorización, el bagazo es incorporado inadecuadamente a campos agrícolas, desechado en vertederos ilegales o quemado, lo cual representa un problema ambiental.

El BATA tiene un alto potencial para ser revalorizado en diferentes procesos como es el caso de la producción de metano mediante digestión anaerobia. Sin embargo, por la alta recalcitrancia del bagazo de agave es necesario realizar un pretratamiento con el objetivo de permitir el acceso a las enzimas durante la hidrólisis enzimática y mejorar los rendimientos en la concentración de azúcares obtenidos (sacarificación). Actualmente, el uso de líquidos iónicos (LI) ha generado interés por su capacidad de desestabilizar la matriz lignocelulósica sin la degradación de la celulosa lográndose obtener altos rendimientos en la sacarificación. Sin embargo, una de sus desventajas es su toxicidad para bioprocesos posteriores como la digestión anaerobia, razón por la cual es necesario realizar un lavado de la biomasa lignocelulósica después del pretratamiento para disminuir la concentración de LI residual, aunque este lavado permite la recuperación del LI, también ocasiona que se consuman grandes cantidades de agua en el proceso. Otra de sus desventajas es su elevado costo, por lo que el uso de líquidos iónicos próticos es una alternativa dado que son menos costosos y más sencillos de producir, como es el caso del acetato de etanolamina [EOA][OAc], el cual ha demostrado ser efectivo para pretratar diversas materias primas lignocelulósicas. En este contexto, el efecto del remanente de [EOA][OAc] proveniente del pretratamiento del BATA sobre el proceso de la digestión anaerobia no ha sido estudiado a detalle (Pérez-Pimienta *et al.*, 2020; Pérez-Pimienta *et al.*, 2021; Pérez-Pimienta *et al.*, 2024). Por lo que, el propósito de este estudio fue evaluar el efecto del líquido iónico [EOA][OAc] sobre la producción de metano en la digestión anaerobia. El desarrollo del conocimiento en esta área permitiría reducir la cantidad de agua necesaria en los lavados después del pretratamiento del BATA.

Materiales y Métodos

Pretratamiento del BATA

Se realizó una mezcla del BATA con el líquido iónico [EOA][OAc] para obtener una solución con una carga de sólidos al 20%. En seguida, las muestras se calentaron en un horno a 160 °C por 90 minutos siguiendo el protocolo de Pérez-Pimienta *et al.*, (2021). Posteriormente se realizaron 5 lavados con agua destilada para eliminar el [EOA][OAc] residual, utilizando una relación de 40 mL de agua destilada por 1 g de BATA pretratado. Finalmente, el bagazo se secó en un horno de convección a 45 °C durante dos días.

Sacarificación enzimática

La hidrólisis enzimática del bagazo pretratado con [EOA][OAc] se realizó utilizando una carga de sólidos del 11.5 % en una solución amortiguadora de citrato 50 mM (pH 4.26). La sacarificación se logró empleando una mezcla de enzimas comerciales formada por Celluclast 1.5 L (1.86 mg proteína/mL buffer) y Viscozyme L (0.76 mg proteína/mL buffer). Las condiciones de reacción fueron de 40 °C durante 72 h en una incubadora rotatoria (Pérez-Pimienta *et al.*, 2024).

Pruebas de potencial bioquímico de metano

Las pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM) para evaluar el efecto del [EOA][OAc] sobre la producción de metano usando como sustrato los hidrolizados enzimáticos del BATA se llevaron a cabo en un sistema automático para pruebas de PBM (AMPTS II, Bioprocess Control AB, Suecia). Estas pruebas se realizaron en reactores CSTR en lote por cuadruplicado, que fueron agitados mecánicamente a una velocidad de 120 rpm y mantenidos a una temperatura de 37 °C. El volumen de trabajo de las pruebas PBM fue de 360 mL, que incluyó la adición de 3 g-NaHCO₃/L para iniciar a un pH entre 7.3 y 7.5. Además del sustrato, dichas pruebas se realizaron con la adición de un medio mineral cuya composición fue la siguiente (g/L): 1 NH₄Cl, 0.05 CaCl₂ · H₂O, 0.1 MgCl₂ · 6H₂O, 0.1 NaCl y 0.4 KH₂PO₄ · H₂O (Angelidaki y Sanders, 2004).

En las pruebas de PBM se utilizó como inóculo lodo granular anaerobio proveniente de un reactor anaerobio con flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés) de la empresa tequilera Casa Herradura (Amatitán-Jalisco, México), que trata vinazas tequileras. Este lodo tuvo 0.1268 g sólidos totales/g sólido húmedo (gST/gSH) y 0.1125 g sólidos volátiles/g sólido húmedo (gSV/gSH), este inóculo se aplicó en las pruebas de PBM a una concentración de 10 g SV/L. Cabe

mencionar, que previamente a las pruebas de PBM se realizaron dos activaciones al inóculo usando 5 g/L de glucosa como sustrato.

Durante las corridas de PBM se registraron automáticamente en tiempo real los datos correspondientes a la temperatura, presión y volumen de biogás acumulado en NmL (mL normalizado), generando un informe con valores normalizados de caudal y gas acumulado. Adicionalmente, se cuantificaron los monosacáridos, azúcares totales (AT), AGVs iniciales y finales mediante HPLC; además, se realizó la medición de la DQO inicial y final. Las pruebas de PBM incluyeron un control endógeno (datos no mostrados).

Métodos analíticos

El análisis composicional de carbohidratos y lignina del BATA antes y después del pretratamiento, se determinó utilizando el método de NREL/TP-510-42618 del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL). El procedimiento consistió en una hidrólisis ácida tomando 300 mg de biomasa seca y añadiendo 3 mL de H₂SO₄ al 72 %, después se incubó la mezcla por 1.5 h a 30 °C con agitación cada 10 minutos usando una varilla de vidrio. Posteriormente, se diluyó la concentración del ácido hasta el 4 % añadiendo 84 mL de agua destilada para llevar a cabo otra hidrólisis en una autoclave a 121 °C durante 1 h. Finalmente, el hidrolizado ácido se filtró al vacío en crisoles con fondo poroso para ser secados por 12 h a 105 °C, la cantidad de lignina insoluble se determinó por gravimetría con los sólidos que quedaron después del secado. La concentración de glucosa y xilosa del hidrolizado ácido se midió por HPLC en un cromatógrafo Agilent Technologies Waters e2695 equipado con una columna Aminex HPX-87H de Bio-Rad.

La caracterización de los hidrolizados enzimáticos implicó la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO), que se realizó siguiendo el método estandarizado de APHA 5220, usando el kit TNT 822 plus HACH, un digestor DRB200 y un espectrofotómetro DR2800. Por otra parte, se llevó a cabo la cuantificación de azúcares totales como monosacáridos, oligosacáridos, polisacáridos y sus derivados empleando el método colorimétrico de DuBois *et al.*, (1956). Adicionalmente, los monosacáridos como las hexosas (glucosa) y pentosas (xilosa y arabinosa), lactato y ácidos grasos volátiles (acetato, formiato, propionato, butirato, valerato e isovalerato) se cuantificaron por HPLC en un cromatógrafo Agilent Technologies Waters e2695 equipado con una columna Aminex HPX-87H de Bio-Rad.

Resultados y Discusión

El análisis de los principales componentes del BATA sometido al pretratamiento con [EAO][OAc] y el BATA sin pretratamiento indicó incrementos en los porcentajes de glucano y xilano cuando se aplicó el pretratamiento (Tabla 1).

Tabla 1. Análisis composicional de BATA sin pretratar y pretratado

Sustrato	Recuperación de sólidos (%)	Glucano (%)	Xilano (%)	Lignina (%)
BATA sin pretratar	100	33.20	18.30	18.76
BATA pretratado con [EAO][OAc]	63.76	47.60	23.73	13.34

El BATA sometido al pretratamiento con [EAO][OAc] fue usado para realizar la hidrólisis enzimática, al finalizar este procedimiento los hidrolizados enzimáticos de BATA fueron caracterizados en términos de la DQO, azúcares totales, carbohidratos, lactato y ácidos grasos volátiles (Tabla 2). Los resultados mostraron una alta concentración de DQO, que fue un reflejo del rendimiento en azúcares totales obtenidos durante la hidrólisis enzimática. Estos hidrolizados tuvieron altas concentraciones de la aldohexosa glucosa y la aldopentosa xilosa; mientras que la aldopentosa arabinosa tuvo una menor concentración. Por otra parte, las concentraciones de propionato y butirato fueron menores a los valores inhibitorios de la digestión anaerobia 0.9 g/L y 1.8, respectivamente (Wang *et al.*, 2009).

Antes de usar como sustrato los hidrolizados enzimáticos de BATA pretratado con [EAO][OAc], se realizó un estudio utilizando la metodología del ensayo de la superficie de respuesta bajo las mismas condiciones indicadas para las pruebas de PBM. Durante este estudio previo, que no se reporta en este trabajo, se calcularon los puntos óptimos para la producción de metano usando glucosa como sustrato modelo y [EAO][OAc], aplicando valores de 3 a 7 g/L y 1.5 a 3

%, respectivamente. Los resultados de este estudio previo indicaron que los puntos óptimos para la producción de metano fueron 3.839 g/L de glucosa y 2.234 % p/v [EAO][OAc] para producir 2975 NmL de metano.

Tabla 2. Caracterización de los hidrolizados enzimáticos de BATA pretratado con [EAO][OAc]

Compuesto	Concentración (g/L)
DQO	146.56 ± 2.83
Azúcares totales	125.06 ± 2.93
<i>Carbohidratos</i>	
Glucosa	43.13 ± 1.28
Xilosa	14.70 ± 0.46
Arabinosa	3.21 ± 1.07
<i>Lactato y ácidos grasos volátiles</i>	
Lactato	0.420
Fórmico	0.104
Acetato	0.243
Propionato	0.112
Isobutirato	0.084
Butirato	0.072

A partir de los resultados sobre los puntos óptimos para la producción de metano se realizaron las pruebas de PBM usando como los hidrolizados enzimáticos de BATA y en combinación con el líquido iónico [EAO][OAc], manteniendo una relación constante de 3.839 azúcares totales g/L entre las pruebas. Adicionalmente, se incluyó una prueba usando como sustrato solo el [EAO][OAc] para conocer su participación en la producción de metano debido al acetato, que directamente sería convertido en metano por la vía acetótrofa (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de la producción de metano (NmL) usando valores óptimos para la glucosa y el [EAO][OAc]

Tratamiento	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4	Promedio
Hidrolizados enzimáticos	399	399	441	407	412 ± 20
Hidrolizados enzimáticos + [EOA][OAc]	2694	2530	2713	2508	2611 ± 107
[EOA][OAc]	1907	2063	1878	1831	1920 ± 100

Los resultados sobre la producción de metano aplicando los puntos óptimos se calcularon restando los valores obtenidos del control endógeno (15.4 NmL de metano) con el propósito de eliminar el aporte del inóculo a los valores obtenidos en cada prueba de PBM. El tratamiento de los hidrolizados enzimáticos con [EAO][OAc] tuvo la mayor producción de metano, el volumen acumulado de metano durante esta prueba de PBM alcanzó un valor cercano al 90 % de la producción máxima teórica esperada de acuerdo al resultado que se obtuvo con la metodología de superficie de respuesta para encontrar los puntos óptimos (2975 NmL de metano). Pérez-Pimienta *et al.*, (2024) logró una producción de 2556 ± 443 NmL de metano bajo las condiciones de 5 g/L de azúcares totales y 2.5 % p/v [EAO][OAc]. Dado que el tratamiento con únicamente hidrolizados enzimáticos tan solo produjo el 14 % de la producción máxima teórica, entonces el acetato del líquido iónico está aportando la mayor parte del carbono para la metanogénesis. En cuanto a la prueba de PBM con solo [EAO][OAc], ésta alcanzó el 34.5 % de la producción máxima teórica. En este contexto, la sumatoria la producción de metano de los tratamientos con los hidrolizados enzimáticos y el [EAO][OAc] equivale a 2332 NmL, la diferencia entre está sumatoria y el tratamiento de los hidrolizados enzimáticos con [EAO][OAc] entra en el rango de las desviaciones estándar.

Durante las pruebas de PBM la DQO removida indicó un bajo consumo de la materia orgánica en el tratamiento con hidrolizados enzimáticos, aunque tuvo el mayor rendimiento. En relación con la prueba de PBM de hidrolizados enzimáticos con [EAO][OAc] se obtuvo la mayor velocidad volumétrica de producción de metano; mientras que el trataiento con solo [EAO][OAc] tuvo los menores valores en velocidad y rendimiento (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros sobre la producción de metano usando los valores óptimos para la glucosa y el [EAO][OAc]

Condición	DQO inicial (g/L)	DQO final (g/L)	DQO removida (%)	VVPM ¹ (L-CH ₄ /L d)	Rendimiento (L-CH ₄ /g-DQO _{removida})
Hidrolizados enzimáticos	6.776	2.894	57	0.229	0.295
Hidrolizados enzimáticos + [EOA][OAc]	34.488	8.354	76	0.315	0.278
[EOA][OAc]	30.894	10.362	66	0.157	0.260

¹ VVPM = Velocidad volumétrica de producción de metano.

Los bajos rendimientos en los tratamientos que contenían [EAO][OAc] podrían indicar un fenómeno de inhibición de la sintrofia acetótrofa obligada donde participan bacterias acetógenas y arqueas acetótrofes para la producción de metano (Snell-Castro *et al.*, 2019). En este contexto, el tratamiento de los hidrolizados enzimáticos con [EAO][OAc] y el tratamiento con solo [EAO][OAc] tuvieron una concentración final de acetato equivalente a 4.00 g/L y 5.75 g/L, respectivamente. Dado que está sintrofia es inhibida por altas concentraciones de acetato, entonces la cantidad de acetato en estos tratamientos pudo colapsar esta vía de producción de metano impactando negativamente en los rendimientos (Wang *et al.*, 2009).

Por otra parte, los resultados sobre las concentraciones iniciales y finales de azúcares totales, glucosa y xilosa indicaron que el consumo de azúcares totales alcanzó más del 95 % en todos los tratamientos que contenían hidrolizados enzimáticos (Tabla 5).

Tabla 5. Valores de azúcares totales, glucosa y xilosa en los tratamientos que contenían hidrolizados enzimáticos

Tratamiento	Azúcares totales (g/L)		Glucosa (g/L)		Xilosa (g/L)	
	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final
Hidrolizados enzimáticos	3.737 ± 0.09	0.105 ± 0.008	1.749	ND	0.813	ND
Hidrolizados enzimáticos + [EOA][OAc]	3.535 ± 0.06	0.055 ± 0.002	1.717	ND	0.787	ND

Al parecer, la ausencia de altas concentraciones de acetato y el alto consumo de glucosa y xilosa en el tratamiento con los hidrolizados enzimáticos favoreció el desempeño de la comunidad microbiana, que condujo a lograr el mayor rendimiento en la producción de metano.

Conclusiones

En este estudio se evaluó el efecto del líquido iónico [EAO][OAc] sobre la producción de metano usando como sustrato hidrolizados enzimáticos de BATA utilizando los valores óptimos obtenidos previamente usando como factores glucosa como sustrato modelo y el [EAO][OAc]. En cuanto a la producción de metano, se evidenció que tanto las azúcares glucosa y xilosa como el acetato aportado por el [EAO][OAc] fueron asimilados y favorecieron la metanogénesis. A pesar de este efecto positivo en la producción de metano, se observó un efecto inhibitorio sobre la metanogénesis acetótrofa en los tratamientos que contenían [EAO][OAc], esto fue más evidente en el tratamiento que solo contenía [EAO][OAc].

Agradecimientos y financiamiento: Este estudio fue financiado por el Fondo Sectorial SENER-CONACyT Sustentabilidad Energética, Clúster Biocombustibles Gaseosos (Proyecto 247006). Jhovana Lizeth Lozano-López agradece al CONACyT (ahora SECIHTI) por la beca de maestría otorgada.

Bibliografía

- Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3, 117–129.
- Cedeño-Cruz, M. (2003). Tequila production from agave: Historical influences and contemporary processes. En *The Alcohol Textbook* (p. 223).

- Consejo Regulador del Tequila. (2024). *Informe de actividades 2024. Información estadística*. Recuperado el 10 de junio de 2025 de <https://www.crt.org.mx>
- Pérez-Pimienta, J. A., Icaza-Herrera, J. P., Méndez-Acosta, H. O., González-Álvarez, V., Mendoza-Pérez, J. A., & Arreola-Vargas, J. (2020). Bioderived ionic liquid-based pretreatment enhances methane production from *Agave tequilana* bagasse. *RSC Advances*, 10(24), 14025–14032. <https://doi.org/10.1039/D0RA01849J>
- Pérez-Pimienta, J. A., García-López, R. M., Méndez-Acosta, H. O., González-Álvarez, V., Simmons, B. A., Mendoza-Pérez, J. A., & Arreola-Vargas, J. (2021). Ionic liquid–water mixtures enhance pretreatment and anaerobic digestion of agave bagasse. *Industrial Crops and Products*, 171, 113924. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113924>
- Pérez-Pimienta, J. A., Castillo-Preciado, D. J., González-Álvarez, V., & Méndez-Acosta, H. O. (2024). Optimization of cost-effective enzymatic saccharification using low-cost protic ionic liquid as pretreatment agent in agave bagasse. *Waste Management*, 175, 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.01.001>
- Snell-Castro, R., Méndez-Acosta, H. O., Arreola-Vargas, J., González-Álvarez, V., Pintado-González, M., González-Morales, M. T., & Godon, J. J. (2019). Active prokaryotic population dynamics exhibit high correlation to reactor performance during methane production from acid hydrolysates of *Agave tequilana* var. azul bagasse. *Journal of Applied Microbiology*, 126(5), 1618–1630. <https://doi.org/10.1111/jam.14234>
- Wang, Y., Zhang, Y., Wang, J., & Meng, L. (2009). Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria. *Biomass and Bioenergy*, 33(5), 848–853. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.01.007>

Percepciones de la comunidad estudiantil sobre el Desarrollo Sustentable y la gestión del agua en Veracruz-Boca del Río

María Inés Mota-Gómez ¹, Vania Jatziri Hernández-Herrera ¹ y Fabiola Lango Reynoso ^{1,*}

¹ Instituto Tecnológico de Boca del Río/ Tecnológico Nacional de México. Boca del Río, Veracruz. México.

* Autor de correspondencia: fabiolalango@gdelrio.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Sociedad, salud y seguridad)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 4 de abril de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i1.540>

Resumen: Este artículo analiza los resultados de una encuesta aplicada a una muestra de estudiantes de diversos niveles sobre su percepción acerca del Desarrollo Sustentable y la gestión del agua. El estudio reveló que el 90% de los participantes ha escuchado el término "Desarrollo Sustentable", asociándolo principalmente con la preservación de recursos para futuras generaciones. Sin embargo, solo el 40% conoce acciones específicas para contribuir a este objetivo. Entre las prácticas más comunes destacan el ahorro de agua (80.1%). Respecto al suministro de agua, el 51.7% calificó su calidad como "buena", pero el 83.7% reportó escasez (ocasional o frecuente) en el último año. Los problemas más graves identificados fueron la contaminación de ríos (48%) y las fugas en la red de distribución (45.5%). La percepción sobre la gestión gubernamental fue crítica: el 67.5% consideró que las autoridades no promueven adecuadamente el desarrollo sustentable, y solo el 29.7% conoce las fuentes de abastecimiento local. A pesar de esto, el 90.1% reconoció que el mal uso del agua afecta la sostenibilidad, y el 45.5% ha participado en actividades comunitarias para su cuidado. Existe una alta conciencia sobre la importancia de la sustentabilidad, pero persisten brechas en conocimiento y acción colectiva, señalando la necesidad de políticas públicas más efectivas y participación ciudadana activa.

Palabras clave: escasez, calidad del agua, suministro, gestión

Student perceptions of sustainable development and water management in Veracruz-Boca del Río

Abstract: This article analyzes the results of a survey conducted among a sample of students from various levels regarding their perceptions of Sustainable Development and water management. The study revealed that 90% of participants had heard the term "Sustainable Development," associating it primarily with the preservation of resources for future generations. However, only 40% were aware of specific actions to contribute to this goal. Among the most common practices was water conservation (80.1%). Regarding water supply, 51.7% rated its quality as "good," but 83.7% reported scarcity (occasional or frequent) in the last year. The most serious problems identified were river pollution (48%) and leaks in the distribution network (45.5%). Perceptions of government management were critical: 67.5% considered that authorities do not adequately promote sustainable development, and only 29.7% were aware of local supply sources. Despite this, 90.1% recognized that poor water use affects sustainability, and 45.5% have participated in community activities to protect it. There is a high awareness of the importance of sustainability, but gaps in knowledge and collective action persist, highlighting the need for more effective public policies and active citizen participation.

Keywords: scarcity, water quality, supply, management

Introducción

El desarrollo sustentable y la gestión eficiente del agua representan pilares fundamentales para garantizar la seguridad hídrica y el equilibrio ecológico, especialmente en contextos urbanos (ONU, 2015). La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible destaca la importancia del Objetivo 6 ("Agua limpia y saneamiento"), subrayando la necesidad de participación comunitaria y políticas públicas integradas (UN-Water, 2018). Sin embargo, estudios como el de Bakker (2012) revelan que la brecha entre la percepción ciudadana y la acción concreta persiste como un desafío global, donde la falta de educación ambiental y la desconfianza en las instituciones limitan el progreso. Por ejemplo, comunidades asentadas en áreas naturales protegidas muestran una percepción clara sobre la escasez de agua y otros impactos derivados del cambio climático, resultado de su conocimiento empírico y su interacción cotidiana con los recursos naturales (Olmos Martínez *et al.*, 2013). De manera similar, en contextos escolares, se ha identificado que los estudiantes presentan una conciencia ambiental parcial, influida más por valores personales que por una formación técnica sólida (Schultz, 2000), lo que dificulta una gestión responsable del agua y el desarrollo sustentable (Andrade Salazar & Gonzales Portillo, 2019). En México, regiones como Veracruz enfrentan presiones hídricas derivadas del

crecimiento urbano y la contaminación (SEMARNAT, 2020). Debido lo anterior, el objetivo de este artículo es analizar los resultados de una encuesta aplicada en Veracruz y Boca del Río, que explora la percepción local sobre el desarrollo sustentable y la gestión del agua.

Materiales y Métodos

Diseño del estudio

Se realizó un estudio descriptivo y transversal mediante una encuesta estructurada para evaluar la percepción de la población sobre el desarrollo sustentable y la gestión del agua en Veracruz y Boca del Río. El enfoque cuantitativo permitió analizar tendencias generales a partir de datos estadísticos (Hernández-Sampieri *et al.*, 2018).

Población y muestra

- Población objetivo: Residentes adultos (≥ 18 años) de Veracruz y Boca del Río.
- Muestra: 202 participantes seleccionados mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, con base en disponibilidad y accesibilidad.
- Criterios de inclusión: Habitantes de los municipios mencionados, con capacidad para responder la encuesta.

Instrumento de recolección de datos.

Se utilizó un cuestionario digital con 20 preguntas, divididas en tres secciones:

- Datos sociodemográficos: Sexo, edad, nivel educativo y ocupación.
- Percepción sobre desarrollo sustentable: Conocimiento del término, acciones prácticas y valoración de políticas públicas.
- Gestión del agua: Calidad, escasez, problemas locales y prácticas de consumo.

Las preguntas incluyeron opciones cerradas (escala Likert y múltiple choice) y abiertas para respuestas cualitativas.

Proceso de recolección

La encuesta se distribuyó en línea (plataforma Google Forms) durante abril y mayo de 2025. Se promovió mediante redes sociales y colaboración con organizaciones locales para ampliar la participación.

Análisis de datos

- Cuantitativo: Los datos se procesaron con Excel, empleando estadística descriptiva (frecuencias, porcentajes) para variables categóricas.
- Cualitativo: Las respuestas abiertas se categorizaron mediante análisis temático (Braun & Clarke, 2006) para identificar patrones recurrentes.

Consideraciones éticas

Se garantizó el anonimato de los participantes y el consentimiento informado se obtuvo de manera digital antes de iniciar la encuesta.

Resultados y Discusión

El estudio contó con la participación de 202 residentes de Veracruz y Boca del Río, con una distribución de 66.8% hombres y 33.2% mujeres. La mayoría de los participantes (54.2%) se ubicó en el rango de edad entre 18-35 años, y más de la mitad (62.9%) contaba con estudios de licenciatura o posgrado y fueron pertenecientes de la escuela pública federal del Tecnológico Nacional de México (Figura 1). Geográficamente, 39.3% residía en Boca del Río y 30.3% en Veracruz.

3. Nivel de escolaridad

202 respuestas

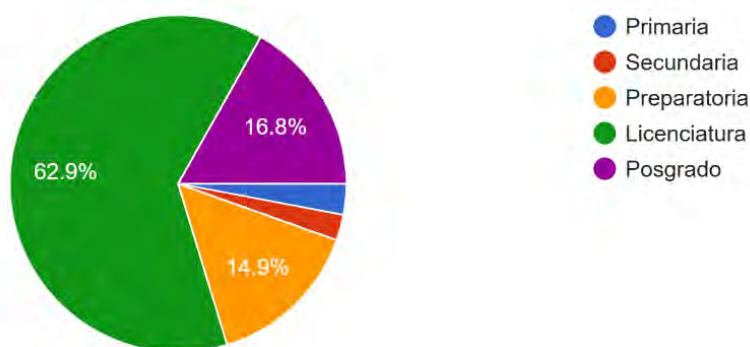


Figura 1. Escolaridad de los participantes encuestados

Un 90% de los encuestados manifestó estar familiarizado con el concepto de desarrollo sustentable asociándolo principalmente con "satisfacer las necesidades actuales sin comprometer el futuro" alineándose con estudios globales que destacan el aumento de la sensibilización ambiental (ONU, 2015). La gran mayoría (95%) como se muestra en la Figura 2 consideró que este enfoque es importante para su comunidad. Sin embargo, se observó una crítica significativa hacia la gestión pública, con 67.5% de los participantes indicando que el gobierno no promueve adecuadamente estas prácticas, por ello es necesario llevar a cabo auditorías ciudadanas que promuevan la educación práctica en escuelas y comunidades.

9. ¿Considera que el Desarrollo Sustentable es importante para su comunidad?

201 respuestas

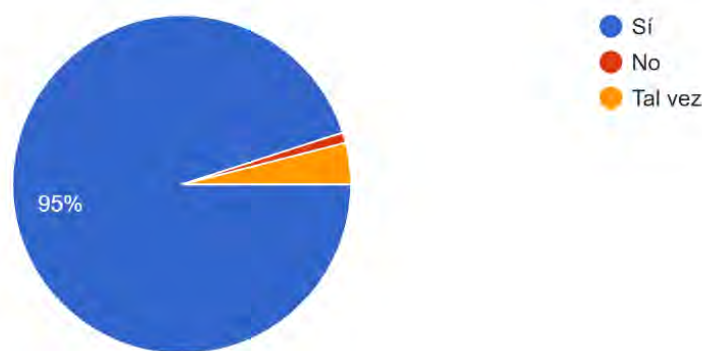


Figura 2. Perspectiva de la importancia del Desarrollo Sustentable para la comunidad

El estudio revela contradicciones entre el alto reconocimiento de la importancia de la sustentabilidad (90% de los encuestados) y la baja implementación de acciones sistémicas, reflejando la urgencia de estrategias multidimensionales que vinculen educación, tecnología y corresponsabilidad social. Referente a las acciones que realiza la población encuestada la acción más popular (Figura 3), con la barra más larga, es el Ahorro de agua. Otras prácticas significativas incluyen el reciclaje, el uso de transporte sostenible y el consumo de productos locales. También se mencionan con frecuencia acciones como economizar comida, reducir el consumo de luz eléctrica, reutilizar materiales, hacer composta y no tirar basura. Opciones como sembrar árboles o captar agua de lluvia aparecen, pero con una frecuencia notablemente menor. Un dato crucial es que la barra correspondiente a "Ninguna" es extremadamente corta, lo que indica que la mayoría de los encuestados sí realiza al menos una acción a favor de la sostenibilidad.

8. ¿Qué acciones relacionadas con el Desarrollo Sustentable practica en su vida diaria?

201 respuestas

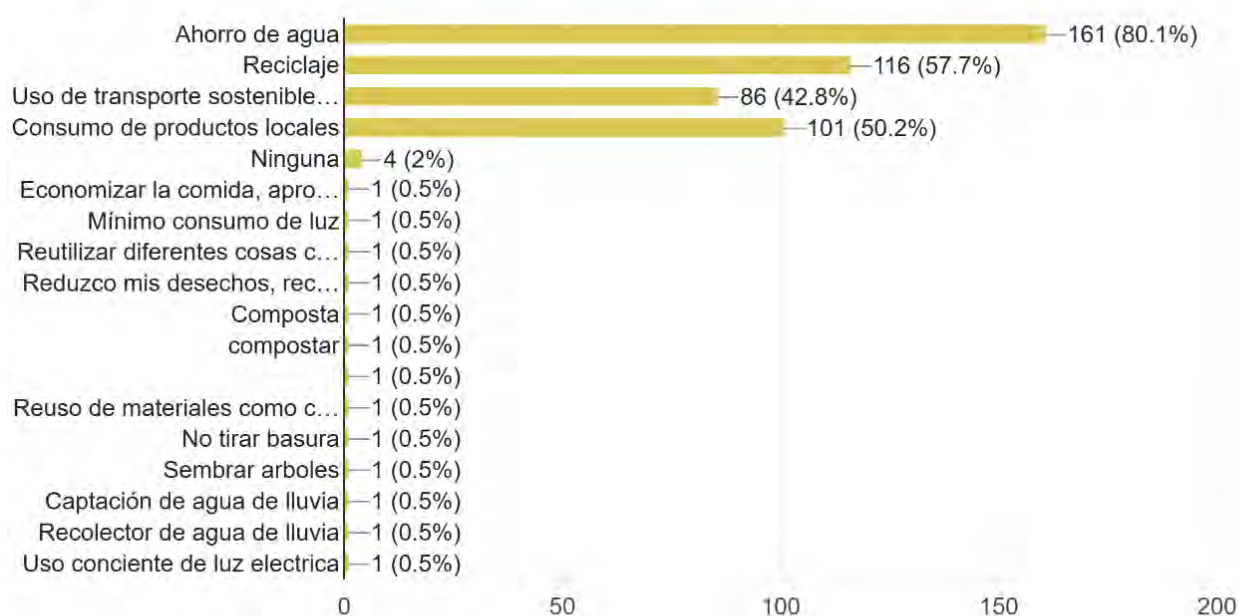


Figura 3. Acciones sostenibles de la población encuestada

La percepción sobre la calidad del agua (51.7% "buena" vs 35.3% "regular") contrasta con los reportes de escasez (83.7% en total), sugiriendo que los usuarios normalizan ciertas carencias del servicio. Este fenómeno, observado también por Wilder (2020) en zonas semiáridas de México, podría explicar por qué, pese a reconocer problemas estructurales como fugas (45.5%) y contaminación (48%), menos de la mitad de los participantes (45.5%) se ha involucrado en soluciones colectivas, una propuesta a esta problemática sería crear una plataforma digital de reportes ciudadanos donde se georreferencie y documente en tiempo real la frecuencia y calidad del servicio, haciendo visible el problema de manera objetiva, además de ser parte de un modelo integral cuyo principal pilar sería la gobernanza y transparencia destacando un portal de transparencia en tiempo real (Rogers & Hall, 2003). En cuanto a hábitos de consumo, destacaron prácticas básicas como cerrar la llave al lavar trastes (89.1%) y reutilizar agua (61.2%), mientras que solo un 17.4% empleaba tecnologías ahorradoras, cifra preocupante que coincide con lo documentado por Bakker (2012) en contextos urbanos de países en desarrollo, revelando oportunidades para mejorar la eficiencia en el uso del recurso.

11. ¿Cómo calificaría la calidad del agua que recibe en su hogar?

201 respuestas

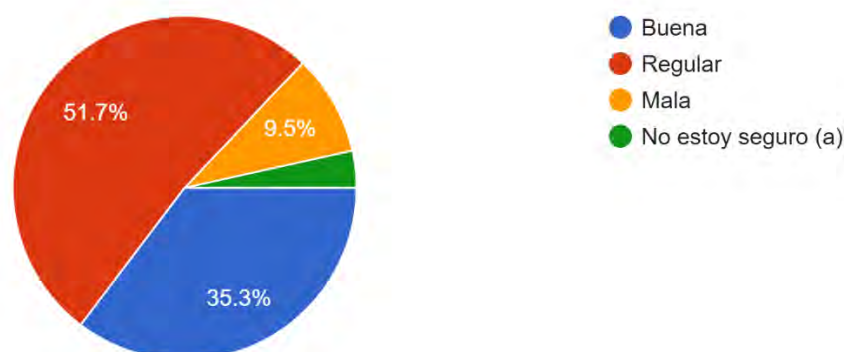


Figura 4. Calidad del agua desde la perspectiva poblacional

12. ¿Ha experimentado escasez de agua en los últimos doce meses?

202 respuestas

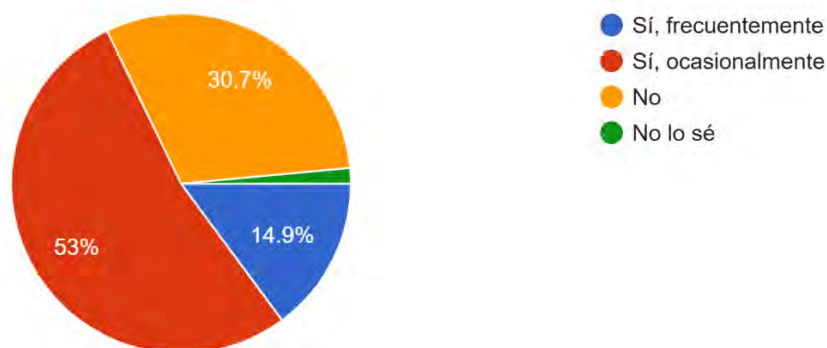


Figura 5. Escasez de agua en el último año

13. ¿Qué problemas relacionados con el agua son más graves en su zona?

202 respuestas

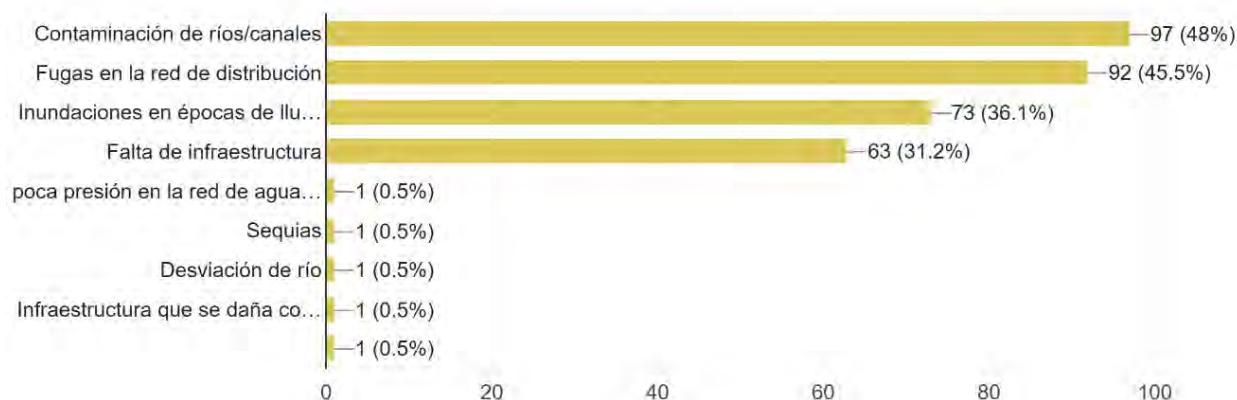


Figura 6. Problemas de la población relacionados con la escasez de agua

14. ¿Qué hace para reducir su consumo de agua?

201 respuestas

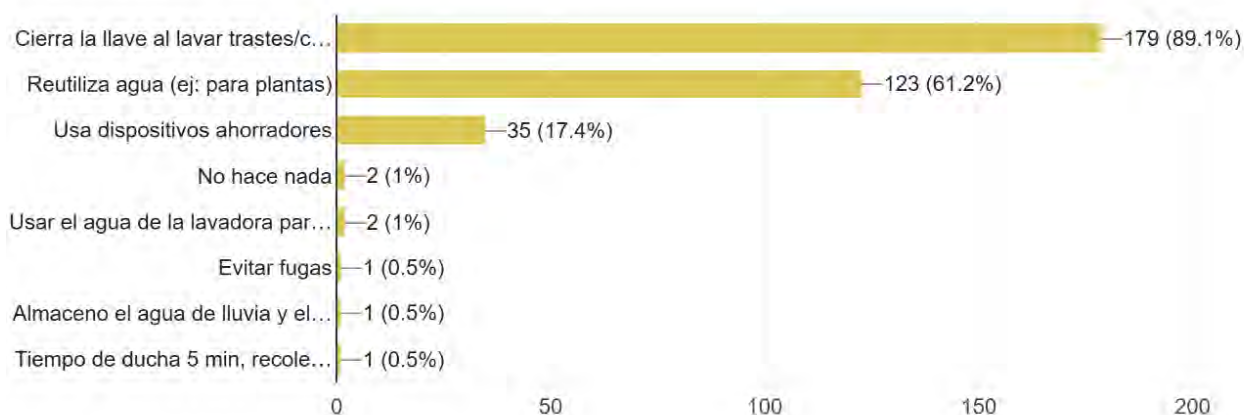


Figura 7. Acciones de ahorro de agua

Los resultados revelaron un notable compromiso comunitario, con el 45.5% de los encuestados habiendo participado en actividades relacionadas con el cuidado del agua, como limpieza de ríos o talleres educativos, mientras que un 33.5% manifestó interés en involucrarse. No obstante, los datos muestran oportunidades prometedoras: el 90.1% vincula explícitamente el mal uso del agua con la sustentabilidad, y el 78% (sumando participantes activos e interesados) manifiesta disposición a colaborar, superando porcentajes reportados en estudios similares (SEMARNAT, 2020). La disposición a pagar por mejoras (40.3% incondicional + 44.8% condicional) sugiere que, con esquemas tarifarios progresivos y transparentes como propone la OECD (2015), podrían generarse recursos para atender los problemas prioritarios señalados: contaminación, infraestructura obsoleta y falta de educación práctica. Las sugerencias ciudadanas (campañas educativas, protección de fuentes) coinciden curiosamente con las "soluciones basadas en la naturaleza" que promueve la UNESCO (2021), indicando que existe un terreno común entre conocimiento local y recomendaciones técnicas, como documenta Cuenca Magdalena Contreras (2023) en sus reportes de actividades, la participación voluntaria en limpiezas y reforestación ha sido la columna vertebral para atraer atención y recursos públicos hacia el río, demostrando que la acción colectiva precede y cataliza la intervención institucional. Así mismo, un estudio de la FAO (2018) sobre eficiencia hídrica en México destacó que los proyectos de tecnificación en Guanajuato tuvieron una alta adopción porque se diseñaron con un modelo de financiamiento compartido y demostración clara de retorno de inversión, alineándose con la lógica de transparencia y progresividad que su estudio sugiere, por otro lado, el programa de The Nature Conservancy (TNC) (2021), en la Península de Yucatán, ha sido pionero en crear "comités de cuenca" y materiales educativos que traducen complejos conceptos hidrogeológicos en mensajes accionables para la comunidad, demostrando que la educación, cuando es práctica y vinculante, es clave para la conservación, tal como lo solicitan los encuestados.

17. ¿Ha participado en actividades comunitarias para cuidar el agua? (Ej: limpieza de ríos, talleres)

200 respuestas

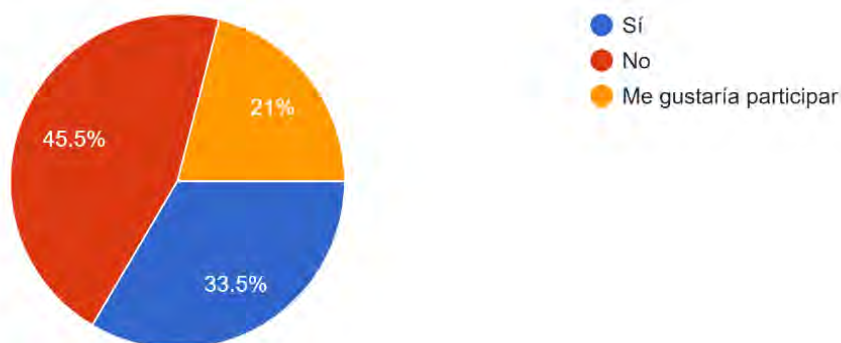


Figura 8. Participación comunitaria para el cuidado del agua

19. ¿Estaría dispuesto(a) a pagar más por un servicio de agua mejorado y sostenible?

201 respuestas

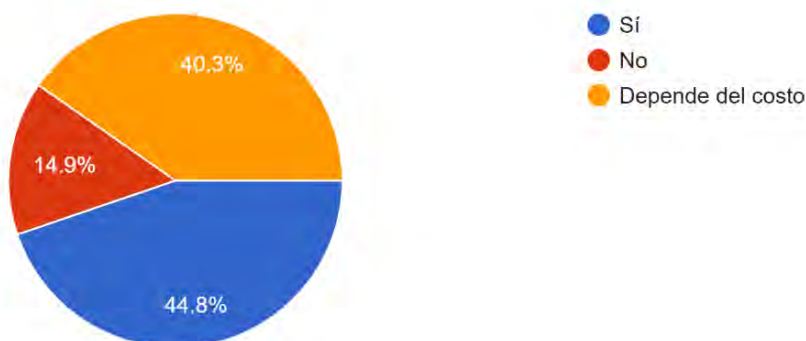


Figura 9. Manifestación de la población dispuesta a colaborar

Conclusiones

Los resultados revelan una triple problemática: 1) normalización de carencias hídricas (83.7% sufre escasez pese a que 51.7% considera el agua "buena"), 2) desconfianza institucional (67.5% critica la gestión pública), y 3) potencial desaprovechado (78% muestra disposición a participar). Para transformar esta realidad, se propone un modelo integral que combine educación práctica con tecnologías accesibles, mecanismos de transparencia que restauren la confianza, y políticas tarifarias progresivas que capitalicen la disposición al pago (40.3-44.8%), priorizando las demandas ciudadanas: protección de fuentes, mejora de infraestructura y campañas educativas. La sostenibilidad hídrica en la región requerirá, más que conciencia individual, una arquitectura institucional que convierta la preocupación ambiental en acción colectiva estructurada.

Agradecimientos y financiamiento: Agradecemos a todos los participantes de la encuesta por su tiempo y respuestas, así como a las instituciones que promueven la reflexión sobre la sustentabilidad del agua.

Bibliografía

- Bakker, K. (2012). *Water security: The challenges of policy and planning*. Routledge.
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *Progreso del cambio en la eficiencia del uso del agua*. FAO. Recuperado de <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/525dd4f3-e5eb-4ece-9bb9-5f80e42c55e4/content>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. P. (2018). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- OECD. (2015). *Governance of water regulation*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264231092-en>
- Olmos Martínez, E., González Ávila, M. E., & Contreras Loera, M. R. (2013). Percepción de la población frente al cambio climático en áreas naturales protegidas de Baja California Sur, México. *Polis. Revista Latinoamericana*, (35). <http://journals.openedition.org/polis/9158>
- ONU. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Rogers, P., & Hall, A. (2003). *Effective water governance*. Global Water Partnership.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). *Informe sobre la situación del agua en México*. SEMARNAT.
- Schultz, P. W. (2000). New environmental theories: Empathizing with nature: The effects of perspective taking on concern for environmental issues. *Journal of Social Issues*, 56(3), 391–406. <https://doi.org/10.1111/0022-4537.00174>
- The Nature Conservancy. (2021). *Informe de sostenibilidad: Agua para las personas y la naturaleza en la Península de Yucatán*. The Nature Conservancy.
- UNESCO. (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza para la seguridad hídrica*. UNESCO.
- Wilder, M. (2020). *Water in the Mexican imagination: A political ecology*. University of Arizona Press.