



ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE DESARROLLO

ALDESER

SUSTENTABLE Y ENERGÍAS RENOVABLES

TENDENCIAS EN ENERGÍAS RENOVABLES Y SUSTENTABILIDAD

VOL. 4 NO. 3, DICIEMBRE 2025

ISSN: 3061-7049

TERYS

Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad

Vol. 4 Núm. 3 (2025)

Publicado: 30 de noviembre de 2025

Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad, Vol. 4, No. 3, Diciembre 2025, 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, 24 de enero 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

Propuesta metodológica para estimar evapotranspiración real en el distrito de riego Tula Hidalgo México, usando percepción remota	1-11
Jorge Flores-Velázquez, Monserrat Ramírez Martínez, Francisco Garcia, Victor Gordillo	
De la agricultura tradicional a la Inteligencia Artificial: Soluciones innovadoras para aumentar la producción y el rendimiento de los cultivos	12-17
Rita Flores-Asís, José Roberto Grande-Ramírez, Alina Evelyn Badillo Márquez, Ramiro Meza-Palacios, Alejandra C. Valdés-Álvarez	
La economía circular como paradigma en transformación: dimensiones filosófico-conceptuales y praxis global	18-28
Francisco Javier Mejía Ochoa, Marco Antonio Rosas Leyva, Juan Carlos Rojas Martínez, Gregorio Hernández Salinas	
Conversión de Vehículos de Combustión Interna a Eléctricos: Impacto Socioeconómico, Ambiental y en Salud Pública en la Megalópolis Mexicana	29-39
Ismael Cervantes de Anda, Alberto Jesús Alcántara Méndez, Raúl Santillán-Luna, Felipe de Jesús Figueroa del Prado	
Análisis numérico CFD del proceso de combustión de una estufa eficiente de biomasa: eficiencia global, rendimiento térmico y emisiones de CO₂e	40-50
Paulo C. Medina Mendoza, Alberto Beltrán Morales, Wenceslao C. Bonilla Blancas, Martín Salazar Pereyra	
Una experiencia formativa con finalidad sustentable: construcción con segmentos longitudinales de tallo de bambú	51-60
Alfonso Rivas-Cruces, José Juan 'Guerrero Correa, Mario Salomé Ramírez Centeno	
Extracción y actividad óptica de pigmentos obtenidos a partir de residuos de fresa para su uso como Sensibilizantes Naturales en celdas solares tipo DSSC	61-65
Maria Cristina Castañon-Bautista, Susana Navarro-Garcia, América Xiomara Jiménez-Pérez, Rodrigo Vivar-Ocampo; Alicia Ravelo-García; José Francisco Armendáriz-López	
Sistema de Automatización residencial basado en el uso de Energías Renovables	66-74
Raul Castillo-Meraz, Carmen del Pilar Suárez-Rodríguez, Yoshio Josafat Del Ángel-Rubio, Fátima María Isabel De los Santos-García	
Valorización bioenergética de residuos del beneficiado húmedo de café mediante digestión anaerobia	75-83
Noemi Nava-Valente, Daniel Simón Olivo-Alanís, Noé Luiz-Santos, Luis Antonio López-Escobar, Eduardo Hernández Aguilar	
Identificación de parámetros para la extracción de glucósidos de Stevia Rebaudiana en base seca como una alternativa a los edulcorantes artificiales	84-93
Maria Fernanda Castillo Vargas, Eusebio Bolaños Reynoso, Leticia Lopez Zamora, René Reyes Estudillo, Juan Manuel Mendez Contreras	
Modelado del impacto paisajístico para la planificación de plantas fotovoltaicas en tres valles fisiográficos de Veracruz, México	94-107
Katia Fernández-González, Gabriela Díaz-Félix, José Angel Bonilla-Osorio, Carlos Manuel Welsh-Rodríguez	

Evaluación preliminar del potencial coagulante de Moringa oleifera en distintas presentaciones para el tratamiento de aguas residuales de lavandería	108-114
Grecia A. Ortega-Hernandez, Anderson A. Ramírez-Ramírez , Allan Tejeda, Florentina Zurita-Martínez	
Tratamiento de Aguas Residuales de Servicios Cosméticos en Humedales Artificiales con <i>Sagittaria Latifolia</i>	115-122
Montserrat Guadalupe Barco-Méndez, Gaspar López-Ocaña, David Guerrero-Zarate, Carlos Alberto Torrez Balcázar, Melina del Carmen Uribe López	
Remoción de contaminantes de efluentes agrícolas vía humedales artificiales	123-131
Nancy Estrada-Pérez, Gaspar López-Ocaña, Randy Adams-Schroeder, David Guerrero-Zarate, Verónica Isidra Domínguez-Rodríguez	
Desarrollo y evaluación de un protocolo adaptado para la extracción de microplásticos en suelos urbanos	132-139
Andrea Zambrano-Arizpe, Teresa de Jesús Montalvo-Herrera, Mario Jesús Muñoz-Batista, Mónica Calero-de Hoces, David Clemente López-Pérez, Astrid Iriana Sánchez-Vázquez	
Los humedales construidos como estrategia de reúso de aguas residuales de cooperativas escolares rurales en agricultura	140-145
José Antonio Fernández-Viveros, Jacel Adame-García, Saúl Rivera, Félix David Murillo-Cuevas, Mayerlin Sandoval-Herazo	
Importancia del reconocimiento del valor económico de la vivienda sustentable en México	146-155
Gisela Guzmán-Macias, Agustín Amador-Duran	
Alternativas para el aprovechamiento de residuos orgánicos de la producción de mezcal	156-161
Jessica Martinez-Gomez, Rodolfo Amalio Vargas-Méndez, Gloria Lilia Osorio-Gordillo , Karina Delgado-Osorio, Juan Reyes-Reyes	
Implementación de granjas sostenibles domésticas para la autosuficiencia alimentaria	162-170
Leila M. Coyote-Estudillo, Rodolfo A. Vargas-Méndez, Gloria L. Osorio-Gordillo, Juan Reyes-Reyes, Karina Delgado-Osorio	
Humedales construidos como jardineras florales para limpiar el agua residual a nivel domiciliario. Una solución biomimética para apoyar al ambiente	171-176
José Luis Marín-Muñiz, Sergio Aurelio Zamora Castro, Juan Antonio Triana-Tello, José C. Zamora-Castro, Neira Sánchez Zarate, Joaquín Sangabriel Lomelí	
Bioaumentación de un inóculo anaerobio y nitrificación parcial de un efluente de rastro municipal para la implementación de un proceso Anammox	177-182
Sergio Reyes-Rosas, Francisco David Franco-Márquez, Oscar Marín-Peña, Norma Alejandra Vallejo-Cantú, Alejandro Alvarado-Lassman	
Aplicación del proceso de carbonización hidrotérmica empleando cascarilla de arroz para la producción de hidrochar como biocombustible	183-190
Victor Eduardo Ojeda-Rodríguez, Joahnn H. Palacios, Juan Manuel Méndez-Contreras, Norma Alejandra Vallejo-Cantú, Alejandro Alvarado-Lassman, Erik Samuel Rosas-Mendoza	
Transformación comunitaria a través de proyectos socioambientales: Centro de apoyo a proyectos Sustentables, CAPS - La Salle, México	191-196
Mario Moliner-Pérez, Brenda Lizette Ruiz-Herrera, María de los Ángeles Garriga-González	

Determinación por FTIR de los componentes bromatológicos de Lolium perenne bajo esquemas de fertilización y corte en invierno y primavera **197-200**

José Agustín Pacheco-Ortiz, Rigoberto Castro-Rivera , Gisela Aguilar-Benítez, Brenda Yanin Azcárraga-Salinas, Andres Castro-Sierra, Javier Ruiz-Romero

Análisis de reactores nucleares de nueva generación para una transición energética más limpia en México **201-209**

Deyanira Silvestre-Castañeda, Mariana Hernández-Escalante

Ceniza de bagazo de caña de azúcar: Materia prima para la síntesis de un vidrio **210-220**

Zaida Jocelyn Martínez-Hurtado, Claudia Anais Martínez-Dimas, Teresa de Jesús Montalvo-Herrera, Juan Jacobo Ruíz-Valdés, Juan Manuel Hernández-López, Enrique Alfonso López-Guajardo, David Clemente López-Pérez, Astrid Iriana Sánchez-Vázquez

Análisis de la tarifa GDMTH en industrias manufactureras de calzado en México **221-233**

Brandon A. Vergara-Cruz, Andres Salazar-Texco, Cristian Sarmiento-Gómez, Mariana Hernández-Escalante

Propuesta metodológica para estimar evapotranspiración real en el distrito de riego Tula Hidalgo México, usando percepción remota

Jorge Flores-Velázquez ^{1,*}, Monserrat Ramírez Martínez ¹, Francisco García ¹, Víctor Gordillo ²

¹ Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillos. Carretera México Texcoco, Km 36.5 Montecillo, Texcoco, Estado de México. 56230

² Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Jiutepec Morelos. México

* Autor de correspondencia: jorgely@colpos.mx

Desarrollo Sustentable (Agricultura Sustentable)

Recibido: 2 de abril de 2025 Aceptado: 28 de junio de 2025 Publicado: 30 de noviembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.408>

Resumen: La gestión y administración del agua para uso agrícola en México es una actividad que aun puede mejorar la eficiencia en el uso del agua y con ello disponer de volúmenes de agua útil. El estado de Hidalgo, México recibe el agua tratada de la planta de tratamiento y se utiliza para abastecer la zona agrícola en tres distritos de riego. El objetivo fue estimar la evapotranspiración real de cultivo de maíz, usando METRIC Effluent de manera remota y comparar los resultados con el modelo Hargreaves-Samani en el Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo, México regada con aguas residuales. Se utilizaron imágenes de satélite Landsat 7 una para cada mes de enero a diciembre de 2019, para estimar evapotranspiración puntual con EEFlux y METRIC. Las imágenes obtenidas fueron comparadas con estimados con el modelo Hargreaves-Samani usando normales climatológicas. Los resultados son compatibles con ambas metodologías, por lo que se consideran alternativas viables para estimar evapotranspiración real y requerimientos de riego en cultivos. El modelo METRIC permite un seguimiento espacial en el monitoreo y discriminación de datos sobre la superficie terrestre y su practicidad de combinar con otras capas en herramientas espaciales. El Modelo Hargreaves-Samani que usa normales climatológicas es más estable durante el año, aunque su dificultad radica en las bases de datos. La metodología propuesta mediante percepción remota es una herramienta robusta no solo en la estimación de requerimiento de riego en zonas agrícolas, sino que una vez calculada y desplegada en un sistema de información geográfica, permite el monitoreo y gestión del recurso hídrico.

Palabras clave: Hargreaves-Samani, lámina de riego, METRIC, recurso hídrico

Methodological proposal to estimate evapotranspiration real in Tula, Hidalgo Mexico irrigation district using remote perception

Abstract: The management and administration of water for agricultural use in Mexico continues to be a central issue. The state of Hidalgo receives treated water from the third largest treatment plant in the world, which is used to irrigate crops in three irrigation districts. The **objective** of this work was to estimate the real evapotranspiration of corn crops, with the METRIC Effluent software remotely and compare the results with the Hargreaves-Samani model in the area of Hidalgo Mexico irrigated with wastewater. Landsat 7 satellite images were used to estimate point evapotranspiration with EEFlux and METRIC. To analyze the results, the Hargreaves-Samani model was used to estimate the same variable using normal climatologies. The results indicate that both methodologies are effective for estimating actual evapotranspiration and, consequently, for determining crop irrigation requirements. In addition, the METRIC model enables spatial monitoring and data discrimination on the Earth's surface, and is practical for integration with other layers in spatial analysis tools. The Hargreaves-Samani model, which relies on climatological normals, shows greater stability throughout the year; however, its limitation lies in the availability and quality of climate databases. In contrast, the proposed methodology using remote sensing is a robust tool not only for estimating irrigation requirements in agricultural areas, but also for facilitating the monitoring and management of water resources as the results can be visualized in a geographic information system.

Keywords: Hargreaves-Samani, irrigation sheet, METRIC, water resource

Introducción

La agricultura de riego consume a nivel mundial el 69% del agua disponible útil (Martínez *et al.*, 2021). Entre los esfuerzos por reducir este volumen de agua, surge la importancia de estimar de manera precisa tanto de espacial como temporalmente la transpiración de los cultivos agrícolas (Allen *et al.*, 1998). La transpiración es una variable importante en el balance energético de la hoja y del estado hídrico de la planta. Este proceso comprende la evaporación del agua desde las células superficiales en el interior de los espacios intercelulares y su difusión fuera del tejido vegetal. Junto al intercambio de dióxido de carbono (CO₂), se determina la eficiencia de uso del agua de una planta. Las hojas pierden

agua a través de sus estomas como consecuencia de la actividad fotosintética de las células del mesófilo (Squeo y León, 2007).

La evapotranspiración real o de referencia (ET_o) se define como la cantidad de agua perdida por el complejo suelo-planta en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes; mientras que la evapotranspiración potencial (ET_p) es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubre todo el terreno, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada (Ortiz y Chile, 2020). Aun cuando se reconoce que estos conceptos son diferentes, ambos indican cantidades máximas de agua perdida en favor de la atmósfera; por ello, en algunos estudios, han sido considerados como equivalentes (McKenney y Rosenberg, 1993; Henríquez-Dole *et al.*, 2014). La estimación de este valor también ayuda al manejo de recursos naturales, usos ecológicos y otras actividades de planeación (Villa-Nova *et al.*, 2007, Villaseñor y Soto, 2024). La evapotranspiración de referencia y evapotranspiración potencial son intercambiables, y su diferencia ($ET_p - ET_r$) es lo que se conoce como déficit hídrico o de riego. En agricultura se trabaja para que esta diferencia sea mínima, o nula lo que significaría que las plantas siempre tengan suficiente humedad en el suelo para evapotranspirar (Montaner y Sánchez, 1988).

Se han desarrollado metodologías para estimar la ET_r , la mayoría involucra datos del clima y del cultivo. Existe un interés por el uso de atmómetros para estimar la ET_o por ser una alternativa viable (Knox *et al.*, 2011) pero se requiere su calibración y validación local. El uso de atmómetros puede ser una herramienta viable para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) (Mendoza-Pérez *et al.*, 2019), pero a su vez se requiere de apropiada calibración, validación local, así como buena operación y mantenimiento, todos estos componentes representan una alternativa confiable para calendarización de riego en los cultivos agrícolas ya sea en campo abierto o bajo condiciones de invernadero.

Hargreaves y Samani (H-S) (2003, Lujano *et al.*, 2023) propusieron un modelo para estimar la evapotranspiración potencial diaria (mm día^{-1}) basada en datos de temperaturas y radiación solar, que a su vez está condicionada por la localización del sitio. La radiación solar incidente se estima a partir de la radiación solar extraterrestre esto se refiere a la energía que llega a la zona exterior de la atmósfera, en otras palabras, a la radiación que llegaría al suelo si no existiera atmósfera y en función de la latitud y mes del año que se requiera estudiar (Allen *et al.*, 1998).

El método de H-S utiliza la temperatura media y la amplitud estacional a partir de datos de temperaturas máximas y mínimas, además, de datos geográficos, como la latitud de las *Estaciones Meteorológicas* o del sitio de estudio, para la estimación de la radiación extraterrestre (Hargreaves y Samani, 1985). Para valores de la radiación, también pueden utilizar mapas de radiación solar incidente (Campos-Aranda, 2005). En general, la ecuación de Hargreaves tiende a sobrestimar ET_o con respecto a la ecuación Penman-Monteith cuando el valor medio diario de la evapotranspiración es bajo y viceversa. Además, cuando la advección de calor sensible es severa, la ecuación subestima hasta un 25% para periodos diarios (Berengena y Gavilán, 2005). Por otro lado, la ecuación de Hargreaves está recomendada para cálculos semanales o incluso periodos más largos, aunque es posible encontrar estimaciones diarias de ET_o bastante precisas (Hargreaves y Allen, 2002).

Otra alternativa para abarcar superficies tales como los denominados Distritos o Módulos de riego bajo el esquema administrativo en México, es usando percepción remota. Se han desarrollado metodologías que permiten estimar de manera remota variables climáticas de interés agrícola a partir de imágenes en general y de satélite en particular, por ejemplo, usando imágenes Landsat. En la actualidad Google Earth Engine contiene una recopilación de imágenes Landsat desde 1984, además cuenta con una base de datos meteorológicos que derivó en el desarrollo de una aplicación práctica que represente la evapotranspiración en dichas imágenes. La información se encuentra disponible mediante una herramienta llamada Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEflux), basada en el modelo METRIC (Mapeo evapotranspiración a Alta Resolución con Calibración Interna).

Para la agricultura actual la herramienta de percepción remota se ha vuelto indispensable, para analizar paisajes físicos y conocer detalles como los métodos de balance de energía para calcular la evapotranspiración, la modernización por sensores remotos como SEBAL (Bastiaanssen, 2000) y el uso de METRIC (Allen *et al.*, 2007b). Como herramientas de predicción y cálculo de variables de interés que han sido aceptados siendo METRIC-EEFLUX el más utilizado ya que automatiza el cálculo a diferencia de SEBAL (Vázquez, 2019). Zenteno *et al.* (2017) realizaron un trabajo de investigación en la predicción de rendimiento de cultivo de la caña de azúcar mediante imágenes Landsat 7 que permitieron obtener

los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) e índice de estrés de humedad (MSI) y a su vez la evapotranspiración del cultivo (ET_c), calculando la variable de coeficiente de cultivo (K_c) en función de índices NDVI y utilizando la evapotranspiración de referencia (ET_o). De esta forma se obtuvo un rendimiento promedio para la zona de estudio de 114.3 t ha^{-1} .

Niza *et al.* (2021), proponen técnicas para generar un balance hídrico diario y mensual a partir del algoritmo SEBAL para poder calcular los requerimientos hídricos de los cultivos; ya que solo la cubierta vegetal abastecida por las precipitaciones de manera natural en temporales, pero en verano los cultivos suelen ser más exigentes. Esta metodología permite tener un modelo para dar un pronóstico de necesidad de recurso hídrico.

Los métodos o modelos propuestos mediante percepción remota deben ser complementarios no alternativos, resaltando que la percepción remota supera por mucho la cantidad de información por la capacidad espacial y de tiempo para tomar los datos (Sánchez, 2001). Una de las ventajas de la percepción remota es poder obtener la información de algún punto de interés, no siendo necesario encontrarse en el sitio, adicional a eso el método brinda información importante como NDVI, albedo, cubierta terrestre entre otras de grandes extensiones de superficie. Teniendo como desventaja que el servidor puede presentar errores al descargar la información.

METRIC es un modelo de balance energético de superficie que proporciona los mapas de radiación neta (R_n), flujo de calor del suelo (G), calor sensible (H), calor latente (LE), evapotranspiración (ET) y coeficiente de cultivo (K_c). Este sistema utiliza datos meteorológicos con un intervalo de tiempo a cada hora del sistema de asimilación de datos terrestres de América del Norte (NLDAS). Para desarrollar una calibración del balance de energía y el tiempo de ET en las imágenes Landsat y generar el dato de ET_o utilizando radiación solar, velocidad del viento, humedad y temperatura del aire a través de la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2012). Niza *et al.* (2021) reportaron que al comparar los modelos de balance de energía de fuente única (SEBS, QWater Model y METRIC-EEFlux) para estimar la evapotranspiración de referencia en los cultivos de hinojo-maíz y raigrás-trebol encontró resultados similares y congruentes entre SEBS y METRIC EEFlux comparado con el modelo QWater Model que mostró una congruencia más débil.

Salgado y Mateos (2009) realizaron una comparación de CROPWAT y el EEFlux en cultivo de algodón y maíz y encontraron que el modelo CROPWAT en grandes superficies puede tener una desviación de resultados y el modelo EEFlux es de manera puntual de la fecha en que pasa el satélite. El objetivo de este trabajo fue estimar la evapotranspiración real del cultivo de maíz, usando la herramienta METRIC Effluent de manera remota y comparar los resultados con el modelo Hargreaves-Samani en la zona de Hidalgo México regada con aguas tratadas.

Materiales y Métodos

Descripción de la zona de estudio

El distrito de riego 003 Tula tiene registro de más de 100 años que ha sido usado para la actividad agrícola con aguas residuales, actualmente cuenta con aproximadamente 50,000 ha para los cultivos agrícolas, siendo maíz y alfalfa los principales cultivos (Cornejo *et al.*, 2012). El Distrito de Riego 100 Alfajayucan tiene una superficie de 26,016 ha, conformado por tres Unidades de Riego, Chilcuahtla, Alfajayucan e Ixmiquilpan, localizados en los municipios de Tula, Tezontepec, Mixquiahuala, Tepetitlan, Alfajayucan, Chilcuahtla, Ixmiquilpan, Tasquillo (CONAGUA 2016). Las fuentes de abastecimiento de agua en el DR 100 son aguas superficiales que escurren en las presas de almacenamiento Endho, Lic. Javier Rojo Gómez, Lic. Vicente Aguirre, y las presas de derivación, Chilcuahtla, Felipe Ángeles, el Maye, El Tecolote, Pallares, Xotho.

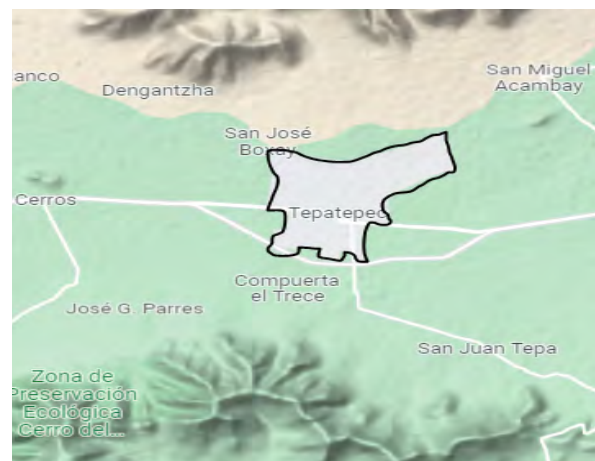


Figura 1 Localización geográfica del área de estudio, Hidalgo México

Los principales cultivos que se siembra en el ciclo agrícola otoño- invierno son; avena, cebada, coliflor, haba, trigo, otros cultivos y para el ciclo Primavera-Verano, calabacita, chile, frijol, coliflor, maíz, jitomate, tomate, y cultivos perennes alfalfa, frutales y otros pastos (Martínez-Luna *et al.*, 2021).

Los cultivos que destacan en el distrito de Ajacuba son alfalfa, maíz grano, coliflor y avena forrajera, con una superficie de 26,481 ha y en menor medida se cultivan chile seco, tomate verde, calabacita y chile verde. Este distrito se destaca por la producción de maíz grano, alfalfa y avena forrajera con una superficie sembrada de 5,931 ha (García y Edith, 2019).

Modelo Hargreaves-Samani (H-S) para estimar evapotranspiración

El modelo utilizado para estimar la evapotranspiración potencial fue la de Hargreaves-Samani y se describe en la Ecuación (1).

Para este modelo se usaron bases de datos históricos de 60 años (1956-2016) de variables de Temperatura máxima (T_{max}), Temperatura mínima (T_{min}) y temperatura media. Los datos históricos fueron obtenidos de la estación meteorológica Actopan ubicada en las siguientes coordenadas geográficas de 20.271944° Latitud, -98.941667° Longitud y 1955 m. Esta información se encuentra almacenada en la plataforma del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) mediante CLImate COMputing project (CLICOM).

Los valores de la evapotranspiración potencial diaria se calcularon a nivel diario con la Ecuación (1)

$$ET_0 = 0.00023(t_{med} + 17.78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (1)$$

Donde: ET_0 : Es la evapotranspiración potencial diaria (mm día^{-1}); T_{med} : temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$); T_{max} : temperatura diaria máxima ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} : temperatura diaria mínima ($^{\circ}\text{C}$); R_0 : es la radiación solar extraterrestre en (mm día^{-1}) la cual puede ser estimada en función de la latitud, en este caso se tomó 22° latitud Norte.

Hargreaves propone otra fórmula para estimar la evapotranspiración potencial con la (Ecuación 2) la cual utiliza radiación solar incidente convertida a mm día^{-1}

$$ET_0 = 0.0135(t_{med} + 17.78)R_s \quad (2)$$

Donde: ET_0 : Es la evapotranspiración potencial diaria (mm día^{-1}); T_{med} : Es la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$); R_s : Es la radiación solar incidente, convertida a (mm día^{-1}).

La radiación solar incidente se estima a partir de la radiación solar extraterrestre esto se refiere a la energía que llega a la zona exterior de la atmosfera, en otras palabras, a la radiación que llegaría al suelo si no existiera atmosfera, también en función de la latitud y mes del año (Allen *et al.*, 1998). Para el cálculo esta variable Samani (2000) propuso la (Ecuación 3).

$$R_s = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (3)$$

Donde: R_s : Es la radiación solar incidente (mm d^{-1}); R_0 : Es la radiación solar extraterrestre (mm d^{-1}); KT : Es el coeficiente empírico en función de la presión atmosférica, adimensional; t_{max} : Es la temperatura diaria máxima ($^{\circ}\text{C}$); t_{min} : Es la temperatura diaria mínima ($^{\circ}\text{C}$).

Para conocer el KT , Hargreaves y Samani (1985) recomiendan un valor constante de 0,162 para zonas interiores y 0,19 para las costas. Finalmente simplificando la Ecuación 3 con la 2 se obtuvo la Ecuación (4) considerando 0,17 valor de KT .

$$ET_0 = 0,00023(t_{med} + 17,78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (4)$$

Donde: ET_0 : Es la evapotranspiración potencial diaria, (mm día^{-1}); T_{med} : Es temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$); R_0 : Es la radiación solar extraterrestre en, mm día^{-1} (tablas); T_{max} : Es la temperatura diaria máxima ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} : Es la temperatura diaria mínima ($^{\circ}\text{C}$).

El método de *H-S* utiliza la temperatura media y la amplitud estacional a partir de datos de temperaturas máximas y mínimas (además de datos geográficos, como la latitud de las *Estaciones Meteorológicas* o del sitio de estudio, para la estimación de la radiación extraterrestre (Hargreaves & Samani, 1985). Además, la radiación se puede obtener a partir de mapas de radiación solar incidente (Campos-Aranda, 2005). La ecuación de Hargreaves tiende a sobrestimar ET_0 con respecto a la ecuación Penman-Monteith cuando el valor medio diario de la evapotranspiración es bajo y viceversa. Berengena y Gavilán (2005) mencionan que cuando la advección de calor sensible es severa, la ecuación subestima hasta un 25% de ET_0 para periodos diarios. Por otro lado, la ecuación de Hargreaves está recomendada para cálculos semanales o incluso periodos más largos, aunque es posible encontrar estimaciones diarias de ET_0 bastante precisas (Hargreaves y Allen, 2002).

Para estimar la evapotranspiración real (ET_r), se utilizó la ecuación (5).

$$ET_r = ET_0 * K_c \quad (5)$$

Donde: ET_r : Es la evapotranspiración real del cultivo (mm día^{-1}); ET_0 : Es la evapotranspiración potencial (mm día^{-1}); K_c : Es el Coeficiente de cultivo

El K_c se obtuvo de los cálculos ya registrados por (Palacios, 1997) por día juliano para el cultivo de maíz y alfalfa, tomando en cuenta que en México se realizan dos siembras en el año Otoño-invierno y Primavera-Verano una iniciando en abril y otra en octubre terminando en septiembre y marzo respectivamente.

Descarga de imágenes LANDSAT para estimar evapotranspiración mediante METRIC.

Las imágenes fueron obtenidas en formato geo-TIFF de tamaño aproximadamente de 200 Mb. Con una resolución espacial de 30 m corregidas geográficamente con el sistema de coordenadas WGS84 y la proyección transversal de mercator (UTM zona 14 Norte), para una sola fecha Landsat una por mes, de enero a diciembre del año 2019, con la menor nubosidad posible por medio del programa EEFLUX (Earth Engine Evapotranspiration Flux) esta es una versión de METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) en la página de internet <https://eeflux-level1.appspot.com>, eligiendo la zona de estudio, posteriormente en el lado izquierdo de la pantalla se visualiza un marcador donde se puede especificar la fechas de inicio y termino y finalmente se elige la opción de buscar imagen (Figura 2).

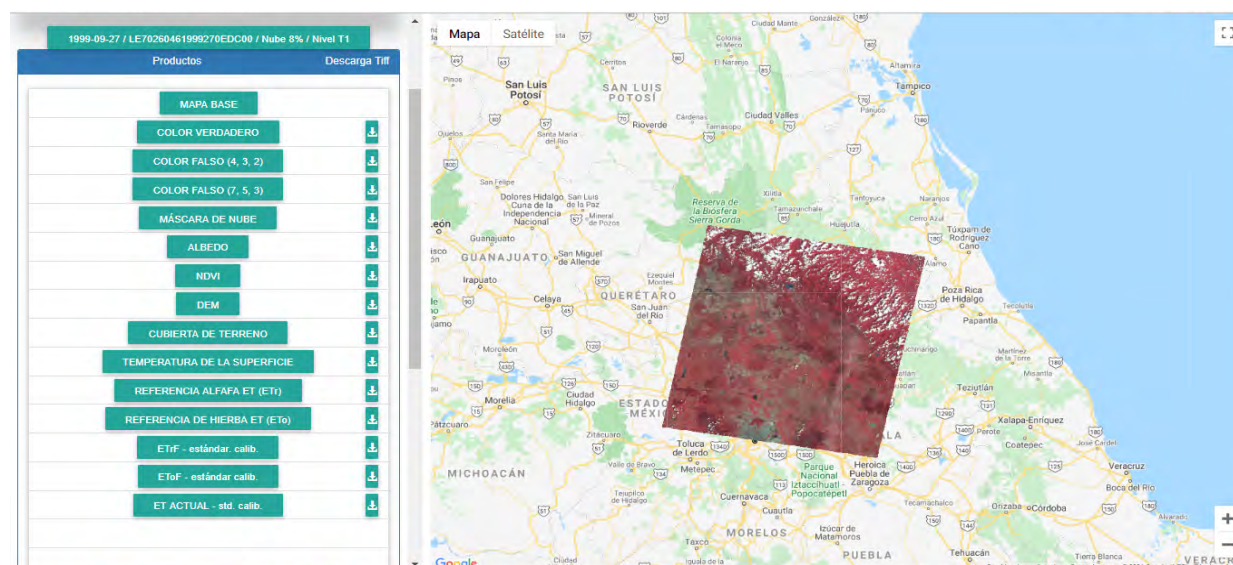


Figura 2. selección de imágenes Landsat de la zona de estudio

La herramienta ofrece un listado de todas las imágenes registradas de la zona del satélite, además, indica la fecha de la imagen y el porcentaje de nubosidad (Figura 3). Para este trabajo de investigación se utilizó el software QGIS 3.10 para el procesamiento de las imágenes y con ello se obtuvo el mosaico de los rasgos de interés en la zona de agrícola (Figura 3).

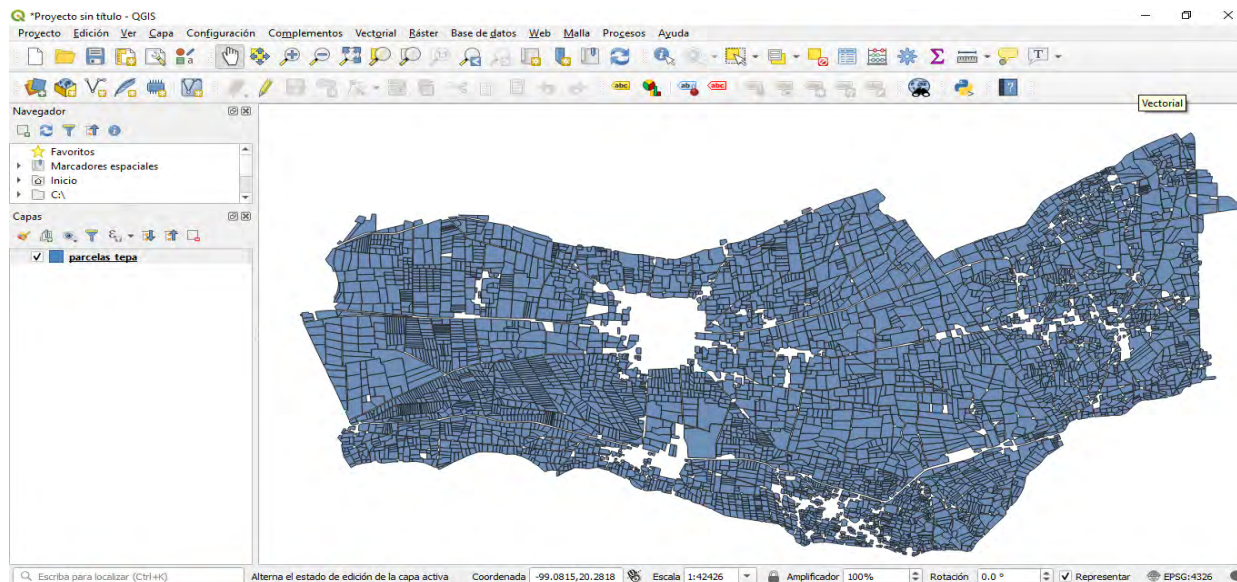


Figura 3. Capa en QGIS de la delimitación de las parcelas de Tepantepec.

Estimación de la evapotranspiración mediante el método METRIC.

La aplicación despliega las bandas térmicas y de onda corta de Landsat para derivar ET (ET real del albedo, la vegetación y otros parámetros de la superficie). Las Imágenes METRIC-EEFlux se calibran internamente a partir de la ET de referencia de alfalfa (ET_o) utilizando datos meteorológicos cuadrículados para recuperar la fracción de ET_o ($ET_o F$). Esta fracción se utilizó para extrapolar instantáneas ET (ET_{ins}) de acuerdo con las ecuaciones dadas (Niza *et al.*, 2021). El primer término, ET_{ins} pertenece a ET en cada píxel en el momento del paso elevado del satélite, derivado del flujo de calor latente (ecuación 6).

$$ET_{ins} = 3600 * \frac{LE}{\lambda * \rho_w} \quad (6)$$

Donde: ET_{ins} : Es la evapotranspiración instantánea (mm h^{-1}); λ : Es el calor latente de vaporización (J kg^{-1}); ρ_w : es la densidad del agua (kg m^{-3}).

La fracción de ET de referencia se calcula como (ecuación 7).

$$ET_o F = \frac{ET_{ins}}{ET_o} \quad (6)$$

Donde: $ET_o F$: Es la fracción de evapotranspiración de referencia; ET_{ins} : Es la evapotranspiración instantánea (mm h^{-1}); ET_o : Es la evapotranspiración de referencia

Al final la ET_a en cada píxel se deriva como ecuación 8.

$$ET_a = ET_o F * ET_o \quad (6)$$

Donde: $ET_o F$: Es la fracción de evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}); ET_o : Es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}).

El principio de EEFlux es congruente con el método tradicional de la FAO para ET real (referencia $ET_o \times K_c$), donde ET_o es similar al coeficiente de cultivo (K_c). En este método, los píxeles calientes y fríos estimados a partir de ET_o se utilizan en el modelado sensible flujo de calor (H).

Este modelo obtiene la ET_r mediante un balance de energía derivada de las imágenes de banda térmica provenientes de los satélites Landsat 7 los valores se obtienen mediante una calibración interna en el cálculo de calor sensible H , basada en la relación lineal entre la temperatura radiométrica y la temperatura del aire, se hace la selección de dos píxeles caliente y frío. El píxel cálido corresponde a un suelo desnudo que presenta una alta temperatura y un NDVI típico de este tipo de cubiertas en el que se considera que existe poca o ninguna ET_r de la imagen en zonas no desérticas. El píxel frío, es el extremo opuesto al anterior y marca el techo evapotranspirativo en la imagen, que corresponde a un cultivo de regadío preferiblemente alfalfa o maíz en óptimas condiciones y densa cubierta vegetal presentando, por tanto, un elevado NDVI y una baja temperatura (González *et al.*, 2015). Las imágenes obtenidas están sujetos al paso del satélite en este caso la plataforma (EEFlux) obtiene 2 imágenes, al mes variando el grado de nubosidad.

La observación de los píxeles fríos y calientes se obtiene con el programa QGIS, generando una modificación de las propiedades de la capa: Se coloca ambas capas en el programa QGIS para poder realizar un recorte de la imagen, que corresponderá solo a la zona de estudio (Figura 4) esto puede ser opcional ya que se puede hacer solo con la imagen descargada. Primero se ingresa al menú de “vectorial” y después a la opción “herramientas de geoproc.”.

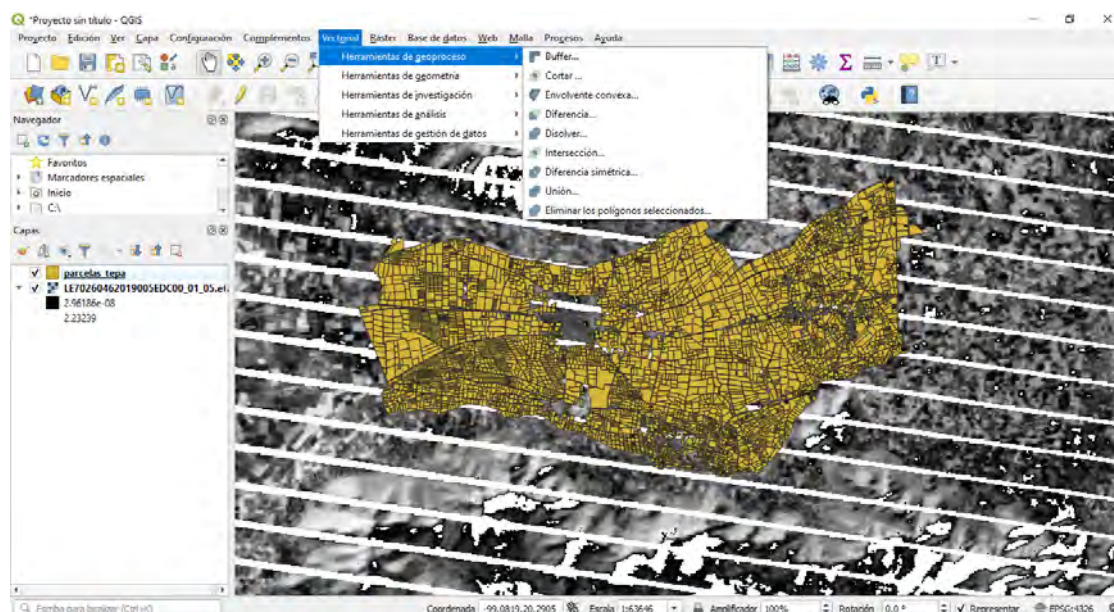


Figura 4. QGIS, herramienta vectorial.

Resultados y Discusión

Se usaron dos metodologías para estimar evapotranspiración real de los cultivos; la primera utiliza base de datos meteorológicos y la segunda imagen de satélites. Los resultados indican que ambas metodologías son concordantes y proporcionan una herramienta para la estimación del consumo del agua.

La metodología METRIC EEFlux con ayuda del programa QGIS se puede estimar la evapotranspiración de cultivo de manera muy sencilla, ya que estos programas son de fácil acceso y de uso muy práctico.

Estimación de valores mensuales de la evapotranspiración de cultivo

Se obtuvieron valores promedios de ET_r mensual de todos los píxeles que corresponden a las parcelas regadas en Tepantepec con aguas residuales por medio de la imagen descargada correspondiente a cada mes (Tabla 1). Se observa que en el mes de julio se presentó el valor más alto de 4.28 mm día^{-1} que coincide con mes más caluroso de la zona y

valores más bajos fueron de 0.92 y 0.51 mm día⁻¹ y se presentaron en los meses de enero y diciembre que coincide con la temporada de frío en la zona de estudio (Tabla 1). Castañeda-Ibáñez *et al.* (2018) con misma metodología de Metric obtuvieron valores de evapotranspiración de 1.0 mm día⁻¹ en el mes de enero y 6.0 mm día⁻¹ en el mes de abril en el Distrito de Riego Rio Yaqui.

Tabla 1. Datos de *ETr* promedio mensual mediante el método Metric EEFlux

Mes	<i>ETr</i> mm día ⁻¹
Enero	0.92
Febrero	1.58
Marzo	1.99
Abril	1.84
Mayo	2.02
Junio	2.30
Julio	4.28
Agosto	3.38
Septiembre	2.33
Octubre	0.85
Noviembre	1.12
Diciembre	0.51

En la Figura 5 se presenta la variación temporal de la evapotranspiración real en los distritos de riego donde es posible observar que en el mes de julio se presentó el valor más alto de la evapotranspiración real y esto coincide con la temporada de lluvia en la zona de estudio. En esta región cuenta con la ventaja de recibir aguas tratadas del valle de México. Esta estimación proporciona información útil en la planeación de las fechas de siembra, tipos de cultivo y en la programación y aplicación más eficiente y oportuna de riegos en los cultivos agrícolas de la zona de estudio.

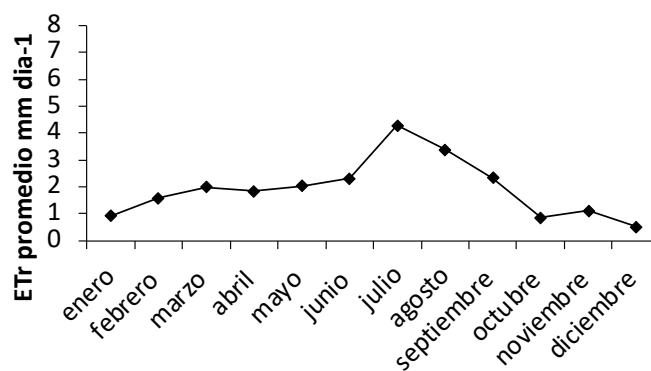


Figura 5. Estimación de la *ETr* promedio mensual por el método de METRIC EEFlux.

Estimación de *ETr* mensual con el método de Hargreaves-Samani

Cuando la evapotranspiración es estimada con datos históricos por el método de Hargreaves-Samani, estos valores presentan un comportamiento estable durante todo el año lo cual tiene sentido, ya que las imágenes de satélite son datos estacionarios (Figura 6).

Otra de las ventajas de estas metodologías es que conociendo la firma espectral de los cultivos es factible llevar a cabo un monitoreo sobre el consumo de agua en los cultivos, lo cual reduce los riesgos de pérdidas de agua de riego y brinda la posibilidad de calendarizar láminas de riego por tipo de cultivo. En la tabla 2 se presentan los

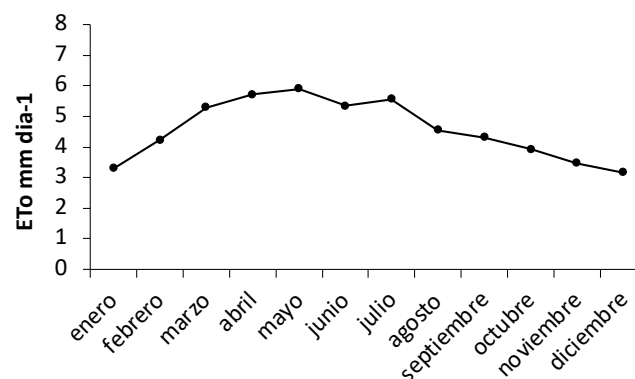


Figura 6. Estimación de la *ETo* promedio mensual obtenida por método de Hargreaves-Samani.

valores de evapotranspiración de referencia, coeficiente de cultivo y la evapotranspiración real para el cultivo del maíz. Con estos valores se puede hacer una mejor planeación en la programación de riego en el cultivo de maíz ya que es el cultivo más importante representativo en todo el país. Se observa que en el mes de febrero y agosto se presentan los valores más altos de coeficiente de cultivo en consecuencia los cultivos que siembran en estos meses requieren mayor volumen de agua para satisfacer sus necesidades hídricas (Figura 7). Reyes *et al.* (2019) reportaron valores similares de Kc en el cultivo de maíz forrajero calculadas in situ con NDVI y estimada con sensores remotos. Los mismos autores mencionan que las curvas de coeficiente de cultivo (kc) ajustado como una función del índice de vegetación de diferencias normalizada (NDVI) obtenidas in situ y estimados con sensores remotos mostraron una misma tendencia con valores de 0.2 a 1.0.

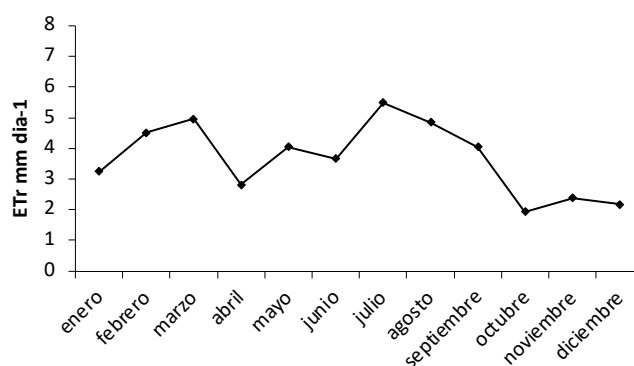


Figura 7. Estimación de la ETr promedio mensual de maíz obtenida por método de Hargreaves-Samani

Tabla 2. Datos de ETo y Kc mensual de maíz para obtener ETr promedio mensual

Mes	ETo mm día ⁻¹	Kc	ETr mm día ⁻¹
Enero	3.30	0.98	3.25
Febrero	4.22	1.06	4.50
Marzo	5.29	0.93	4.96
Abril	5.71	0.49	2.81
Mayo	5.9	0.68	4.05
Junio	5.34	0.68	3.66
Julio	5.57	0.98	5.48
Agosto	4.55	1.06	4.85
Septiembre	4.31	0.93	4.04
Octubre	3.92	0.49	1.93
Noviembre	3.46	0.68	2.37
Diciembre	3.16	0.68	2.17

Comparación del método de METRIC y el de Hargreaves-Samani

Finalmente, en la Figura 8 se presenta la comparación de los valores de evapotranspiración real entre el método de Metric con los valores de Hargreaves-Samani. Por el método de Metri utiliza imágenes de satélite lo que implica que son datos puntuales en el momento que la imagen fue tomada y por el método Hargreaves-Samani utilizan bases de datos normales, se consideran un promedio de más de 24 años por lo que en este tipo de cálculo los valores se consideran más estables que los puntuales.

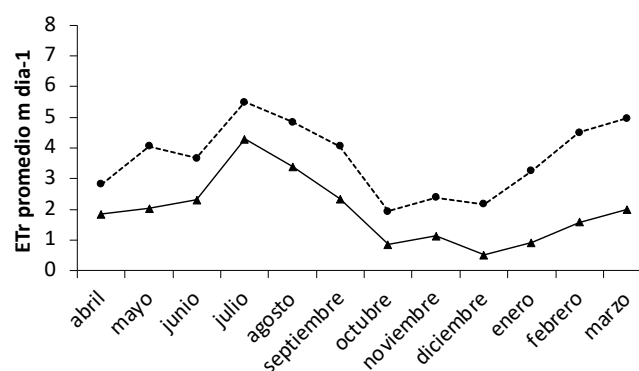


Figura 8. Comparación de la ETr por método Metric y Hargreaves – Samani.

Príncipe (2018) menciona que la técnica de Eddy Covariance (EC) es uno de los métodos más exactos de medición de la ET, sin embargo, presenta la desventaja de medir de manera puntual. Frente a esto el modelo Metric resulta ser un método eficaz para la medición de la ET a nivel espacial, proporcionando valores cercanos a los observados mediante la técnica de EC, siendo esta una alternativa viable de estimación de ET para grandes extensiones de terreno.

Coeficiente de correlación

Se puede apreciar una regresión lineal entre ambos métodos de estimación de la evapotranspiración de cultivo. La dispersión de los puntos tiene un patrón definido. El análisis de regresión lineal es positivo, lo que indica que las variables son dependientes y se pueden explicar mutuamente con una confianza del 67% (Figura 9). Castañeda-Ibáñez *et al.* (2018) obtuvieron una regresión lineal de 82% al correlacionar la *ETo* del Eddy Covariance y en la estimación de *ETo* con el método de Metric.

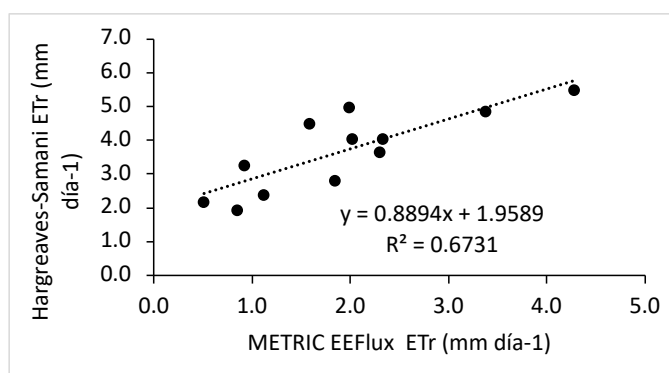


Figura 9. Coeficiente de regresión lineal de *ETo* entre ambos métodos.

Además, Mendoza-Perez *et al* (2019) obtuvieron una regresión lineal de 87% al correlacionar la *ETo* del atmómetro y *ETo* de la estación meteorológica automatizada. French *et al.* (2015) menciona que comparado con otros métodos que utilizan información de imágenes satelitales, Metric tiene mayor confiabilidad cuando los datos terrestres son escasos.

Otros estudios, reportan que METRIC puede mejorar la estimación de la ET, si el proceso de ejecución se hace diferenciando la temperatura del dosel, del suelo sombreado y del suelo a libre iluminación solar (Pôças *et al.*, 2014). Con respecto a la estimación de la eficiencia en el uso del agua, la estimación puede mejorar si se conoce el gasto aplicado a mayor resolución espacial y temporal para detectar las áreas con menor eficiencia en el uso del agua en el distrito de riego. Por lo que los resultados adolecen de la validación que permita contribuir a mejorar el uso y manejo del agua al proponer acciones para incrementar la eficiencia.

Conclusiones

Las nuevas tecnologías de percepción remota permiten obtener resultados puntuales y periódicos que se puedan tomar como referencia en el manejo de agua y dosificación para la parcela. Además, se demostró que el uso de las imágenes de satélite para la estimación de ET es una solución a las limitaciones que presenta los métodos de medida puntual. La metodología Hargreaves–Samani ajustada permitió obtener resultados satisfactorios, siendo su principal ventaja la de requerir sólo de datos de temperatura máxima y mínima del aire, información disponible en gran cantidad de estaciones meteorológicas del país. La zona de cultivo donde se realizó el presente estudio muestra una alta demanda de agua en los meses de marzo y julio. Contar con datos de ET precisos es un apoyo para mantener un control de agua en los canales de riego.

Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *FAO irrigation and drainage paper* 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents> Versión en español: <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R. & Bastiaanssen, W.G.M. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land): Advanced Training and User's Manual. Version 1.0. Idaho Department of Water Resources. Idaho, USA. Pp. 98. <https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>
- Allen, R.G, Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington J., Thau D., Gorelick N., Erickson T., Moore R., Trezza R., Ratcliffe I., & Robison C. (2002). EEFlux: A Landsat-based Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. *ASABE / IA Irrigation Symposium*, 10–12. <https://doi.org/10.13031/irrig.20152143511>
- Allen, R.G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007b). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))

- Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2012). Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO—Food and Agriculture Organization of the United Nations, 297 p., 1998. Crescentes de irrigação com água salina. *ACSA—Agricultura Científica no Semiárido*, 8(4), 60–65. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 87–100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- Berengena, J., & Gavilán, P. (2005). Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2), 147–163. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:2\(147\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(147))
- Castañeda-Ibáñez, C.R., Flores-Magdaleno, H., Martínez-Menes, M., Esparza-Govea, S., Fernández-Reynoso, D., Prado-Hernández, V., & Pascual-Ramírez, F. (2018). Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. *Ecosist. Recur. Agropec*, 5(15), 537–545. <https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1647>
- Campos-Aranda, D. F. (2005). Estimación empírica de la ETP en la República Mexicana. *Ingeniería hidráulica en México*, 20(3), 99–110. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1031>
- Cornejo, O. F., López, H. M., Beltrán, H. R., Acevedo S. O., Lucho, C. C., & Reyes S. M. (2012). Degradación del suelo en el Distrito de riego 003 Tula, Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 12(4), 873–880. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10202203>
- French, A.N., Hunsaker, D.J., & Thorp, K.R. (2015). Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sensing of Environment*, 158, 281–294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.003>
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hargreaves, G.H., & Allen, R.G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53–63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53))
- Henríquez-Dole, L., & Miner-Vega, A. J. (2014). Revisión y validación de la evapotranspiración potencial (ETP) media anual y media mensual en Honduras obtenida por métodos ambientales de percepción remota. *Revista Ciencia y Tecnología*, 14(6), 77–98. <https://doi.org/10.5377/rct.v0i14.1797>
- García, S., & Edith, M. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 29(54), 2–34. <https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741>
- Knox, J., Rodríguez-Díaz, J., & Hess, T. (2011). Estimating Evapotranspiration by Using Atmometers for Irrigation Scheduling in a Humid Environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(11), 685–691. DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943
- Martínez-Luna, D., Mora-Flores, J.S., Exebio-García, A. A., Arana Coronado, O.A., & Arjona-Suárez, E. (2021). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 39, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.544>
- Mendoza, P. C., Ojeda, B.W., Sifuentes, I.E., Quevedo, N.A., Flores, M. H., Ramírez, A.C., & Ascencio, H.R. (2019). Estimación de la evapotranspiración de referencia por atmómetros con fines de calendarización de riego. *Rev. Agric. Zon. Árid. Semiár.*, 37(4), 65–72. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000400065>
- Mckenney, M. S., & Rosenberg, N. J. (1993). Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64, 81–110. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90095-Y](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90095-Y)
- Montaner, S. M., & Sánchez, S. E. (1988). Aproximación, por el método de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de lluvia útil. *Papeles de Geografía*, 14, 223–225. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/42801/41121>
- Niza, Z., Khan, M.S., Govind, A., Marchetti, M., Lasserre, B., Magliulo, E., & Manco, A. (2021). Evaluation of SEBS, METRIC-EEFlux, and QWaterModel Actual Evapotranspiration for a Mediterranean Cropping System in Southern Italy. *Agronomy*, 11, 345. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020345>
- Ortiz, C. R., & Chile, A. M. (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i1.1450>
- Palacios, V.E. (1997). Benefits and Second-Generation Problems of Irrigation Management Transfer in México.
- Pôças, I., Paço, T.A., Cunha, M., Andrade, J.A., Silvestre, J., & Sousa, A. (2014). Satellite-based evapotranspiration of a super-intensive olive orchard: Application of METRIC algorithms. *Biosystems Engineering*, 128, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.019>
- Reyes, G.A., Reta, S.D.G., Sánchez, D.J.I., Ochoa, M.E., Rodríguez, H.K., & Preciado, R.P. (2019). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensores remotos y mediciones in situ. *Terra Latinoamericana*, 37(3), 279–290. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.485>
- Salgado, R.P., & Mateos, L. (2019). Evaluación de métodos para el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos con vistas a la evaluación del desempeño de distritos de riego. *Asociación Española de Riegos y Drenajes y Universidad de Extremadura*. 10.17398/AERYD.2019.A26. <https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/9245/1/A-26.pdf>
- Squeo, F. A., & León, M.F. (2007). Transpiración. En Squeo F.A. y L. Cardemil (Eds.), *Fisiología vegetal*. Ediciones Universidad de La Serena, Chile. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Transpiracion.pdf>
- Sánchez, M. (2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28, 3–10. <https://revistanortegrande.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/46563>
- Samani, Z. (2001). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 265–267. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265))
- Vázquez, B. R. (2019). Estimación de la evapotranspiración de cultivo de maíz bajo riego mediante percepción remota. *Tesis de Maestría*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México. 114p. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2065>
- Villa-Nova, N. A., Pereira, A.B., & Shock, C.C. (2007). Estimation of reference evapotranspiration by an energy balance approach. *Biosystems Engineering*, 96(4), 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.12.005>
- Villaseñor Sánchez, E. I., & Soto Sánchez, A. P. (2024). Desafíos y oportunidades en la gobernanza de áreas verdes urbanas: el caso del Parque Ecológico El Crestón en Oaxaca, México. *Sociedad y Ambiente*, 2024(27), 1–29. <https://doi.org/10.31840/sya.v2024i27.2905>
- Zenteno, C.G.A., Palacios, V.E., Tijerina, C. L., & Magdaleno, F.H. (2017). Aplicación de tecnologías de percepción remota para la estimación del rendimiento en caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1575–1586. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i7.513>

De la agricultura tradicional a la Inteligencia Artificial: Soluciones innovadoras para aumentar la producción y el rendimiento de los cultivos

Rita Flores-Asís ¹, José Roberto Grande-Ramírez ², Alina Evelyn Badillo Márquez ², Ramiro Meza-Palacios ^{2,*}, Alejandra C. Valdés-Álvarez ³

¹ Universidad Veracruzana, Facultad de Negocios y Tecnologías, Ixtaczoquitlán, México/Departamento de Ingeniería en Gestión de Tecnologías de Información, Universidad Virtual del Estado de Guanajuato-UVEG, México.

² División de Estudios de Posgrado, Tecnológico Nacional de México TecNM, Campus Orizaba, Veracruz, México.

³ TecNM/Instituto Tecnológico Superior de Ciudad Serdán, Ave. Tecnológico s/n colonia La Gloria, Cd. Serdán, Puebla.

* Autor de correspondencia: ramiro.mepa@gmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 3 de junio de 2025

Aceptado: 3 de septiembre de 2025

Publicado: 30 de noviembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.465>

Resumen: La agricultura es un sector prioritario en la economía y la seguridad alimentaria, actualmente, la agricultura se enfrenta a retos como el cambio climático y el incremento de la demanda alimentaria, la inclusión de la inteligencia artificial (IA) ha permitido que se pueda innovar en las prácticas agrícolas tradicionales. Se ha utilizado IA para el desarrollo de diferentes herramientas que permiten analizar grandes volúmenes de datos provenientes de variables como clima, suelo, cultivos y otros parámetros físicos y bioquímicos que permiten facilitar decisiones informadas para optimizar el uso de recursos y aumentar la productividad.

Existen herramientas como redes neuronales, sistemas expertos y algoritmos de inferencia que han demostrado su eficacia en la predicción y optimización de rendimiento de la producción, en el uso de nuevos mecanismos para la fertilización y la gestión de recursos, ajustándose a las necesidades específicas de cada cultivo y región. En el presente trabajo se expone un panorama general de algunas de las herramientas basadas en mecanismo de inferencia impulsados por IA que se han implementado con éxito en el sector agrícola, y que han logrado optimizar los recursos favoreciendo la productividad y la rentabilidad económica.

Palabras clave: agroindustria; inteligencia artificial; RNA; sistemas expertos

Introducción

La inteligencia artificial (IA) en la agricultura se puede definir como el uso de algoritmos y modelos computacionales que permiten a las máquinas procesar y analizar grandes volúmenes de datos agrícolas, identificar patrones y relaciones, y tomar decisiones o hacer predicciones para optimizar la productividad, eficiencia y sostenibilidad en el sector agroalimentario. Esto abarca aplicaciones como la agricultura de precisión, el monitoreo de cultivos, el análisis predictivo, la automatización de procesos y la mejora de la calidad y seguridad alimentaria (Taneja *et al.*, 2023).

La transición de la agricultura tradicional hacia la adopción de tecnologías innovadoras representa uno de los mayores avances en la historia de la producción agrícola. Durante siglos, la agricultura se basó en prácticas empíricas y técnicas heredadas, limitando el potencial de los cultivos frente a desafíos como el crecimiento poblacional, el cambio climático y la escasez de recursos. Sin embargo, la revolución tecnológica en el sector agroalimentario ha abierto nuevas posibilidades para aumentar la productividad y el rendimiento de los cultivos de manera sostenible y eficiente (Albahri *et al.*, 2023).

Hoy en día, soluciones como la agricultura de precisión, el uso de sensores, la inteligencia artificial, la edición genética, los sistemas hidropónicos y la automatización permiten optimizar el uso de insumos, mejorar la toma de decisiones y adaptar los cultivos a condiciones ambientales cambiantes. Estas innovaciones no solo incrementan los rendimientos, sino que también contribuyen a la sostenibilidad ambiental y a la seguridad alimentaria global, al reducir el uso de agroquímicos, conservar recursos y mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas (Yang, X., 2024).

El desarrollo y la integración de estas tecnologías requieren la colaboración entre científicos, agricultores, empresas y gobiernos, así como la capacitación y el acceso equitativo a las herramientas digitales. Así, la agricultura del futuro se perfila como un sector dinámico, capaz de responder a los retos globales mediante la aplicación de soluciones inteligentes y sostenibles.

El sector agroindustrial es uno de los pilares de la economía global, impacta en la seguridad alimentaria de la población, además de influir directamente en el desarrollo económico mundial. En México, por ejemplo, se estima una participación en el producto interno bruto (PIB) de prácticamente el 2% (Statista, 2024), generando empleo y promoviendo el comercio exterior, a través de las exportaciones (Ambriz, 2024).

Retos actuales de la agroindustria

La importancia de la agroindustria se extiende más allá de la economía, ya que también es de vital importancia para el desarrollo social y rural. La agroindustria representa un canal de estabilidad a futuro que permita el crecimiento económico y la posibilidad de un desarrollo sustentable, que puede influir potencialmente en el posicionamiento productivo de las potencias económicas (Purroy Vasquez *et al.*, 2024).

La IA se ha convertido en una herramienta clave en muchas áreas del sector agroindustrial, incluyendo la agricultura. Este sector enfrenta grandes desafíos, como el cambio climático y el crecimiento de la población, y la IA puede ayudar a hacer frente a estos problemas. Con el aumento de la demanda de alimentos, la agricultura está buscando nuevas formas de mejorar su eficiencia y productividad. La IA ofrece un enfoque revolucionario al permitir el análisis de grandes volúmenes de datos, como se observa en la Figura 1, facilitando la toma de decisiones informadas que pueden mejorar tanto el rendimiento de los cultivos como la sostenibilidad del uso de recursos.

La IA ha transformado la agroindustria, modernizando las prácticas agrícolas tradicionales y mejorando la eficiencia y productividad de los cultivos. La IA funciona imitando la forma en que el cerebro humano aprende de la experiencia. Utilizando ciertos métodos matemáticos, la IA puede predecir futuros eventos, lo que permite a los agricultores tomar decisiones más informadas y anticiparse a las condiciones climáticas y otras variables (Barragán González, 2024). Esto permite tener mejor soporte para la toma de decisiones en los diferentes procedimientos agrícolas, como el momento ideal para la siembra, la fertilización y la cosecha de los diferentes productos agrícolas, permitiendo hacer un mejor uso de los recursos naturales y económicos. Por lo tanto, la IA se utiliza en múltiples ámbitos de la agricultura, contribuyendo a aumentar el rendimiento de los cultivos y a minimizar los riesgos asociados. Los datos generados a partir de diferentes ámbitos agrícolas, como el clima, el suelo, la temperatura, la humedad, el riego, los requisitos de siembra y otros criterios relacionados con los cultivos, se analizan e integran para realizar predicciones agrícolas.

Desarrollo

La IA aplicada al sector agrícola para aumentar la rentabilidad de los cultivos, no solo es necesario prever momentos clave como la siembra y la cosecha, sino también tener en cuenta los precios de los insumos y minimizar los riesgos, como la falta de lluvia, las malas hierbas y las plagas. Además, la IA se utiliza para la previsión de precios de cultivos y productos básicos, así como para la automatización agrícola mediante robots, en algunos casos, se implementa modelos para predecir los rendimientos de los cultivos agrícolas utilizando una red neuronal artificial (RNA). Una RNA

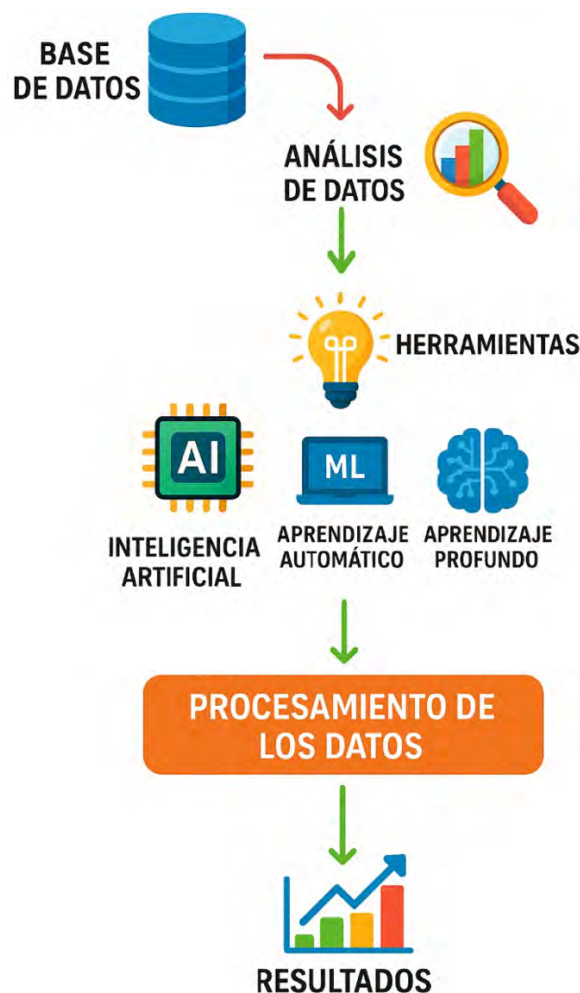


Figura 1. Metodología de procesamiento en la IA (creación propia).

es un sistema computacional inspirado en la estructura y funcionamiento del cerebro humano, compuesto por unidades interconectadas llamadas "neuronas artificiales" que procesan información en respuesta a estímulos externos (Moein, 2017), para predecir con gran precisión, aspectos como el rendimiento de los cultivos y el uso de energía, lo que permite optimizar la producción. Los resultados han demostrado que este enfoque puede mejorar la eficiencia y aumentar la productividad de los cultivos de mandarina, logrando un rendimiento de 25,740 kg por hectárea, lo que demuestra el impacto positivo de la inteligencia artificial en la agroindustria (Nabavi-Pelesaraei *et al.*, 2014).

La IA también está revolucionando el monitoreo y correcto tratamiento de los cultivos. Gracias a imágenes satelitales y drones equipados con cámaras de alta resolución, los sistemas de IA pueden analizar en tiempo real el estado de los cultivos, identificando áreas afectadas por plagas, enfermedades o estrés hídrico (Barragán González, 2024). Además, la IA mejora la gestión de la cadena de suministro, optimizando rutas de transporte y predecir la demanda de productos agrícolas, lo que reduce costos operativos y minimiza el desperdicio de alimentos.

En el ámbito académico, cursos como "Introducción a la Inteligencia Artificial en la Agroindustria" ofrecen una visión general sobre cómo la IA puede transformar prácticas agrícolas, mejorar la eficiencia y optimizar la producción (Incio Flores *et al.*, 2021). Además, la IA permite la automatización de tareas repetitivas como la siembra, el riego y la cosecha, aumentando la productividad y reduciendo la necesidad de mano de obra humana.

Casos de estudio y aplicaciones prácticas

Las aplicaciones de la IA en este campo son diversas y abarcan desde la agricultura de precisión hasta la automatización de procesos. Por ejemplo, tecnologías como drones y sensores permiten monitorear las condiciones del suelo y la salud de los cultivos en tiempo real, lo que ayuda a los agricultores a detectar problemas antes de que se conviertan en crisis. Además, los sistemas inteligentes pueden predecir los rendimientos de los cultivos y ayudar a planificar mejor la siembra y la cosecha, reduciendo pérdidas y mejorando la eficiencia.

En este contexto, es crucial explorar cómo la inteligencia artificial no solo está redefiniendo las prácticas agrícolas tradicionales, sino también contribuyendo a un futuro más sostenible y eficiente en la producción alimentaria. La integración de estas tecnologías promete no solo aumentar la competitividad del sector agroindustrial, sino también garantizar un suministro alimentario más seguro y accesible para las generaciones venideras.

El desarrollo de sistemas expertos (DSS) y las tecnologías basadas en inteligencia artificial han sido aplicados con éxito para optimizar las dosis de fertilización en plantaciones agrícolas. Estos sistemas suelen utilizar modelos de simulación que consideran el estado nutricional del suelo, el balance de nutrientes en la planta, y las condiciones climáticas actuales y previstas (Rodríguez-Aguirre *et al.*, 2023).

Uno de los ejemplos más destacados es el DSS desarrollado por Silva *et al.* (2016), que emplea un enfoque de balance de nutrientes para determinar las necesidades de fertilización de los árboles de naranja, el balance de nutrientes se basa en el principio de conservación de la masa: los nutrientes que ingresan a un sistema (por ejemplo, fertilizantes) deben igualar los nutrientes que salen (cosecha) para evitar deficiencias o excesos. En agricultura, el balance se calcula considerando entradas (fertilizantes, abonos, fijación biológica) y salidas (extracción por cultivos, pérdidas por erosión o lixiviación). En este trabajo se propone un DSS que permite ajustar las dosis de fertilizantes en función de las características específicas del suelo y del árbol, lo que ha resultado en mejoras significativas en la eficiencia del uso de fertilizantes y en la productividad del cultivo (Maia da Silva *et al.*, 2016).

Investigaciones previas han mostrado cómo la inteligencia artificial puede ser útil para predecir la producción de cultivos, como las naranjas. Un enfoque que ha demostrado ser eficaz es el uso de sistemas llamados 'redes neuronales', que imitan cómo aprende el cerebro humano, por medio de neuronas artificiales, como se muestra en la Figura 2. Estos sistemas han logrado predecir con buena precisión los rendimientos de las naranjas, adaptándose bien a diferentes condiciones climáticas y regionales. Sin embargo, sigue siendo un área en desarrollo, con oportunidades para mejorar la precisión y la robustez de los modelos mediante la incorporación de datos adicionales y la refinación de las técnicas de modelado (Yang *et al.*, 2024).

La IA se ha implementado con éxito con el objetivo de predecir los rendimientos de los cultivos agrícolas, tal es el caso de una investigación realizada en 2020, en el que se utilizó un modelo de inteligencia artificial para predecir el rendimiento de los cultivos de mandarina. Este modelo emplea un tipo de red neuronal que se 'entrena' con datos sobre los nutrientes del suelo. Aunque el modelo puede generar predicciones útiles, los resultados pueden variar un poco cada vez que se ejecuta debido a la manera en que se ajustan los parámetros. A pesar de esto, sigue siendo una herramienta útil para los agricultores que buscan anticipar los resultados de sus cultivos (Dong *et al.*, 2020).

En otro estudio, los investigadores propusieron un modelo de inteligencia artificial para mejorar el rendimiento de los cultivos de banano. Este modelo se alimenta de datos sobre nutrientes en el suelo, como nitrógeno, potasio y magnesio, y predice cómo estos factores afectan el crecimiento y la calidad del fruto. Los resultados demostraron que, al reducir el uso de fertilizantes químicos, se puede mantener o incluso aumentar el rendimiento de las plantas, lo que también reduce el impacto ambiental. Este enfoque es una prueba más de cómo la inteligencia artificial puede ayudar a hacer la agricultura más sostenible y eficiente (Ramezanzpour & Farajpour, 2022).

Los algoritmos de inferencia son procedimientos computacionales diseñados para extraer conclusiones o estimaciones sobre variables desconocidas a partir de datos observados y modelos probabilísticos. “ Su objetivo principal es deducir información sobre parámetros, estados ocultos o estructuras subyacentes en presencia de incertidumbre” (Zdeborová, L., & Krzakala, F.,2015) Los resultados mostraron que este modelo fue capaz de predecir de manera precisa las necesidades de fertilización en un 92.86% de los casos, lo que facilita la tarea de los agricultores y les permite tomar decisiones más informadas y eficientes (Juhi Reshma & John Aravindhar, 2022).

En otro caso, se desarrolló un modelo para predecir los niveles de nutrientes en el suelo (como nitrógeno, fósforo y potasio) utilizando redes neuronales e inteligencia artificial. Este modelo realiza un análisis químico del suelo y utiliza la tecnología de espectroscopía para medir la concentración de estos nutrientes. Los resultados del modelo demostraron una alta precisión en la predicción de los niveles de nutrientes, lo que puede ayudar a los agricultores a optimizar el uso de fertilizantes y mejorar la salud del suelo (Malaysia, 2020). En la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales aplicaciones de la IA en el sector agrícola.

Tabla 1. Aplicaciones de la IA en la agricultura.

Tipo de Cultivo	IA Empleada	Resultados
Mandarina	Red neuronal artificial (RNA)	Predicción del rendimiento de cultivos. Se logró un rendimiento de 25,740 kg por hectárea, demostrando el impacto positivo de la IA.
Naranja	Sistema experto (DSS) con un enfoque de balance de nutrientes	Optimización de las dosis de fertilizantes, resultando en mejoras en la eficiencia del uso de fertilizantes y en la productividad.
Naranja	Redes neuronales	Se ha demostrado que son eficaces para predecir con precisión el rendimiento de las naranjas, adaptándose a diferentes condiciones climáticas y regionales.

RED NEURONAL

Aprende imitando cómo aprende el cerebro humano

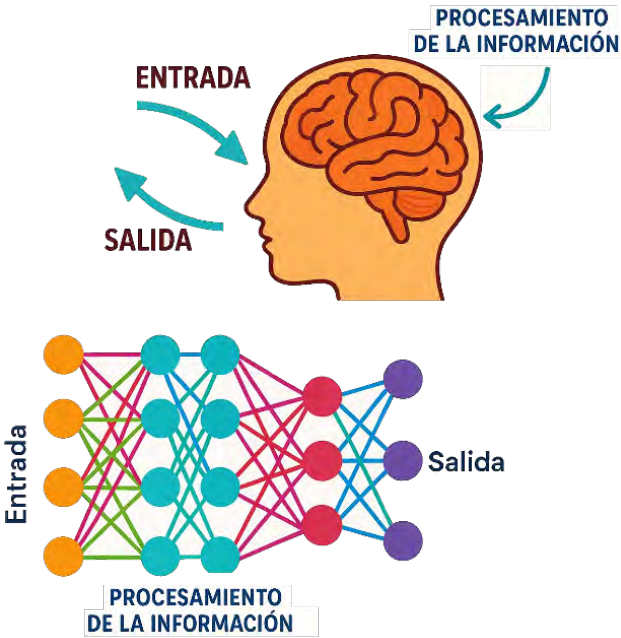


Figura 2. Proceso de aprendizaje de una red neuronal artificial (creación propia).

Tabla 1 (Continuación). Aplicaciones de la IA en la agricultura.

Tipo de Cultivo	IA Empleada	Resultados
Banano	Red neuronal artificial y algoritmo genético	Se mantuvo o aumentó el rendimiento de las plantas mientras se reducía el uso de fertilizantes químicos. Ayuda a hacer la agricultura más sostenible y eficiente.
General (para diferentes cultivos)	Algoritmos de inferencia	Análisis de parámetros químicos como el pH del suelo y los nutrientes para recomendar la cantidad exacta de fertilizantes. El modelo fue capaz de predecir las necesidades de fertilización con un 92.86% de precisión.
General (para diferentes cultivos)	Redes neuronales e inteligencia artificial	Se predijeron los niveles de nutrientes en el suelo (nitrógeno, fósforo y potasio) con alta precisión, lo que ayuda a optimizar el uso de fertilizantes y mejorar la salud del suelo.

Conclusiones

A través de este recorrido por las diferentes aplicaciones impulsadas por la inteligencia artificial (IA) logramos concluir que la IA representa una herramienta disruptiva e indispensable para la modernización y sostenibilidad de la agricultura. El estudio realizado muestra que algunas herramientas como el uso de redes neuronales, sistemas expertos y algoritmos de inferencia permiten optimizar algunas actividades relevantes en el proceso agrícola como la fertilización, el monitoreo de cultivos, la predicción de rendimientos y la gestión de recursos.

Los resultados observados en la implementación de herramientas impulsadas por IA en cultivos, como mandarina, naranja y banano, resaltan incrementos significativos en la productividad y la eficiencia de los cultivos contribuyendo a una agricultura más sostenible. Así mismo, la IA facilita la automatización de actividades repetitivas y el monitoreo en tiempo real, mejorando la capacidad de respuesta ante plagas, el control de parámetros bioquímicos y condiciones climáticas adversas.

La aplicación científica de la IA en la agricultura no solo incrementa la productividad y rentabilidad del sector, sino que también representa una estrategia para garantizar la seguridad alimentaria y el desarrollo sustentable del sector agrícola.

A pesar de todas las ventajas que representa el uso de la IA en los procesos agroindustriales, en específico en el sector agrícola, aún existen retos que limitan su uso, por ejemplo, la inversión inicial en tecnologías de IA, sensores y conectividad es alta, dificultando el acceso para pequeños y medianos productores, especialmente en regiones con infraestructura limitada, por otro lado, la carencia de internet confiable y de infraestructura digital en zonas rurales limita la recolección y transmisión de datos necesarios para sistemas inteligentes, a lo que se suma la falta de personal capacitado y la resistencia al cambio.

Bibliografía

- Ambriz, A. (2024). Agroindustria: Importancia en México. Eezy Gro. <https://www.eezygro.com.mx/articulos/agroindustria-importancia-en-mexico>
- Albahri, G., Alyamani, A. A., Badran, A., Hijazi, A., Nasser, M., Maresca, M., & Baydoun, E. (2023). Enhancing essential grains yield for sustainable food security and bio-safe agriculture through latest innovative approaches. *Agronomy*, 13(7), 1709. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071709>
- Barragán González, A. (2024). El Impacto de la Inteligencia Artificial en la Agroindustria. HegameX. <https://www.hegameX.com/post/el-impacto-de-la-inteligencia-artificial-en-la-agroindustria>
- Dong, Y., Fu, Z., Peng, Y., Zheng, Y., Yan, H., & Li, X. (2020). Precision fertilization method of field crops based on the Wavelet-BP neural network in China. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118735. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118735>
- Incio Flores, F. A., Capuñay Sanchez, D. L., Estela Urbina, R. O., Valles Coral, M. Á., Vergara Medrano, E. E., & Elera Gonzales, D. G. (2021). Inteligencia artificial en educación: una revisión de la literatura en revistas científicas internacionales. *Apuntes Universitarios*, 12(1). <https://doi.org/10.17162/au.v12i1.974>

- Purroy Vasquez, R., Aguilar Lasserre, A. A., Meza Palacios, R., & Fernández Lambert, G. (2024). Artificial neural network (ANN) in forecasting of poverty line and economic-energetic efficiencies into the maize-based agroecosystems. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 70(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2287751>
- Juhi Reshma, S. R. & John Aravindhar D. (2022). A Systematic Approach of Classifying Soil & Crop Nutrient Using Machine Learning Algorithms. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 10(2s), 174–179. <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/2380>
- Nabavi-Pelesaraei, A., Fatehi, F., & Mahmoudi, A. (2014). Prediction of yield and economic indices for tangerine production using artificial neural networks based on energy consumption. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 4(5), 57–64.. <http://www.innspub.net>
- Maia da Silva, F. F., Ferreira, D. A., Monte, F. J. Q., de Mattos, M. C., & de Lemos, T. L. G. (2016). The orange peel as biocatalyst for the hydrolysis of esters. *Industrial Crops and Products*, 84, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.01.017>
- Moein, S. (2017). Definition of artificial neural network. In *Artificial Intelligence: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 1-11). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1759-7.CH001>.
- Ramezanzpour, M. R., & Farajpour, M. (2022). Application of artificial neural networks and genetic algorithm to predict and optimize greenhouse banana fruit yield through nitrogen, potassium and magnesium. *PLoS ONE*, 17(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264040>
- Rodríguez-Aguirre, E., Badillo-Márquez, A. E., Aguilar-Lasserre, A. A., & Flores-Asis, R. (2025). An agent-based model to evaluate agricultural vulnerability and risk facing climate change in strawberry production. *Crop Science*, 65(1), e21100. <https://doi.org/10.1002/csc2.21100>
- Taneja, A., Nair, G., Joshi, M., Sharma, S., Sharma, S., Jambrak, A., Roselló-Soto, E., Barba, F. J., Castagnini, J., Leksawasdi, N., & Phimolsiripol, Y. (2023). Artificial Intelligence: Implications for the Agri-Food Sector. *Agronomy*, 13(5), 1397. <https://doi.org/10.3390/agronomy13051397>
- Yang, T., Mei, Y., Xu, L., Yu, H., & Chen, Y. (2024). Application of question answering systems for intelligent agriculture production and sustainable management: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 204, 107497. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107497>
- Yang, X., Xiong, J., Du, T., Ju, X., Gan, Y., Li, S., Xia, L., Shen, Y., Pacenka, S., Steenhuis, T., Siddique, K., Kang, S., & Butterbach-Bahl, K. (2024). Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health. *Nature Communications*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44464-9>
- Zdeborová, L., & Krzakala, F. (2015). Statistical physics of inference: thresholds and algorithms. *Advances in Physics*, 65, 453 - 552. <https://doi.org/10.1080/00018732.2016.1211393>

La economía circular como paradigma en transformación: dimensiones filosófico-conceptuales y praxis global

Francisco Javier Mejía-Ochoa *, Marco Antonio Rosas-Leyva, Juan Carlos Rojas-Martínez y Gregorio Hernández-Salinas

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: francisco_javier_mejia_125@zongolica.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Economía Circular)

Recibido: 2 de abril de 2025 Aceptado: 3 de junio de 2025 Publicado: 1 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.416>

Resumen: El presente trabajo explora la economía circular como paradigma en transformación, analizando sus implicaciones filosófico-conceptuales y su aplicación práctica a escala global. A partir de una revisión documental descriptiva, se examinaron fuentes indexadas en diversas bases de datos de prestigio, aplicando criterios de inclusión y exclusión específicos para abarcar estudios sobre ecología industrial, economía ecológica y enfoques decoloniales. El análisis sistemático evidenció que la economía circular, si bien se concibe como un modelo regenerativo y restaurativo que trasciende la lógica lineal de “tomar-hacer-desechar”, enfrenta importantes retos en la consolidación de sus fundamentos teóricos y en la incorporación de la justicia social. Las estrategias implementadas, tales como el rediseño de productos, la simbiosis industrial y la introducción de modelos de negocio disruptivos, revelan beneficios tangibles en la optimización de costos y la disminución de la huella ecológica. Sin embargo, los casos comparados ponen de manifiesto la necesidad de adaptar las políticas públicas, los incentivos económicos y los marcos regulatorios a los contextos culturales y económicos de cada región. Además, la carencia de indicadores robustos de circularidad, la resistencia al cambio en las cadenas productivas y la falta de participación ciudadana constituyen barreras a la transición. Como conclusiones, se subraya la urgencia de alinear la visión filosófico-conceptual de la economía circular con acciones concretas que trasciendan el ámbito tecnocrático, reforzando la equidad social y la democracia ambiental. Se concluye que la materialización de este paradigma dependerá de la implementación de investigaciones transdisciplinarias, el fortalecimiento de capacidades institucionales y la participación de múltiples actores, desde gobiernos hasta comunidades locales, para garantizar la transformación sistémica de los procesos económicos y su armonización con los límites planetarios.

Palabras clave: economía circular; diseño regenerativo; justicia social; simbiosis industrial; sustentabilidad

The Circular Economy as a Transformational Paradigm: Philosophical-Conceptual Dimensions and Global Praxis

Abstract: This study explores the circular economy as a paradigm undergoing transformation, analyzing its philosophical-conceptual underpinnings and practical application at a global scale. Drawing on a descriptive documentary review, indexed sources from several prestigious databases were examined, applying specific inclusion and exclusion criteria to encompass works on industrial ecology, ecological economics, and decolonial perspectives. The systematic analysis showed that while the circular economy is conceived as a regenerative and restorative model that goes beyond the linear “take-make-dispose” logic, it faces significant challenges in consolidating its theoretical foundations and integrating social justice concerns. Implemented strategies—such as product redesign, industrial symbiosis, and disruptive business models—demonstrate tangible benefits in cost optimization and reduced ecological footprints. Nevertheless, comparative cases highlight the necessity of tailoring public policies, economic incentives, and regulatory frameworks to the cultural and economic contexts of each region. Moreover, the lack of robust circularity indicators, resistance to change in production chains, and limited citizen engagement remain barriers to full transition. In conclusion, the study stresses the urgency of aligning the circular economy’s philosophical-conceptual vision with concrete actions that transcend technocratic approaches by reinforcing social equity and environmental democracy. It finds that the realization of this paradigm depends on implementing transdisciplinary research, strengthening institutional capacities, and engaging multiple stakeholders—from governments to local communities—to ensure a systemic transformation of economic processes and their alignment with planetary boundaries.

Keywords: circular economy; regenerative design; social justice; industrial symbiosis; sustainability.

Introducción

La intensificación de la explotación de los recursos naturales, la generación de residuos y las presiones sobre los ecosistemas han suscitado una inquietud creciente en la comunidad científica y en la esfera pública internacional (Toapanta, 2023). A medida que las sociedades avanzan tecnológicamente y los sistemas económicos se globalizan, la

necesidad de redefinir los patrones de producción y consumo se torna más apremiante. En este contexto, la economía circular se perfila como una vía prometedora para subsanar la actual brecha entre el crecimiento económico y la sostenibilidad, al proponer un enfoque sistémico que contempla el cierre de ciclos de materiales y energía (Imbernó & Souto, 2023). No obstante, tal propuesta conlleva desafíos de índole técnica, normativa y sociocultural, cuyos alcances y limitaciones merecen un análisis detenido a partir de distintas aproximaciones académicas.

La economía circular aspira a revertir la lógica lineal de “tomar-hacer-desechar” mediante la adopción de estrategias que prolonguen la vida útil de los recursos y minimicen la extracción de materias primas vírgenes (García, 2022; Kovacic, 2021). Estas estrategias incluyen, entre otras, el rediseño de productos para su fácil reparación, la implementación de sistemas de depósito y retorno, la valorización de subproductos industriales y la introducción de modelos de negocio basados en el arrendamiento o la servitización (Carrillo & Pomar, 2021; Melendez, *et al.*, 2021). Sin embargo, la dimensión social de la economía circular resulta igualmente determinante, pues implica la transformación de conductas de consumo y la promoción de la justicia ambiental y social, al reconocer las discrepancias históricas en el acceso a los recursos (Vélez, 2021; Nieves & Morales, 2022).

En cuanto al estado del arte, diversas corrientes teóricas y empíricas contribuyen a enriquecer la comprensión de este paradigma. Desde la ecología industrial, se resalta la importancia de diseñar flujos de materia y energía que emulen los ciclos de la naturaleza (Lima, 2022); la economía ecológica subraya la imposibilidad de sostener un crecimiento infinito en un planeta finito (Gómez & Barboza, 2022); y las perspectivas basadas en la ética ambiental y las teorías decoloniales analizan la necesidad de superar la visión antropocéntrica, integrando los conocimientos tradicionales y las reivindicaciones de equidad (Cortez, 2021). De esta manera, la economía circular se entiende como un fenómeno multidimensional, donde confluyen variables económicas, políticas, culturales y tecnológicas, dando lugar a múltiples desafíos y oportunidades en contextos industriales, comunitarios y estatales (Mendoza & Díaz, 2023).

Pese a los avances en la investigación y la práctica, persisten brechas que impiden consolidar plenamente la transición hacia la circularidad. Entre los obstáculos identificados se encuentran la fragmentación de la gobernanza, la resistencia al cambio en las cadenas productivas y de consumo, la insuficiente participación de actores locales y la carencia de indicadores robustos de éxito (Medina & Freire, 2023). Ante este panorama, surge la necesidad de estudios que sistematicen las diversas experiencias y que, además, aporten un análisis crítico sobre la efectividad real de las estrategias impulsadas bajo el rótulo de economía circular.

En este trabajo, de carácter documental descriptivo, se ofrece una revisión y una reflexión analítica sobre la economía circular como paradigma en transformación, con énfasis en sus dimensiones filosófico-conceptuales y en su praxis global. Se examinan los enfoques teóricos más influyentes, así como los casos de estudio que ilustran tanto la adopción exitosa de prácticas circulares como las limitaciones encontradas en diversos sectores productivos y escalas de implementación. A partir de esta revisión, se perfila la contribución de la investigación a la comprensión de las implicaciones de la economía circular para el desarrollo sostenible y equitativo.

En este sentido, la pregunta de investigación que orienta el presente estudio es:

¿Cómo inciden los principios filosófico-conceptuales de la economía circular en la efectividad de las estrategias de implementación a escala global, considerando la diversidad de contextos económicos, sociales y culturales?

Responder a esta pregunta permitirá sistematizar la literatura y proponer un mapa conceptual sobre los fundamentos ontológicos y epistemológicos de la economía circular, describir y analizar los principales obstáculos y oportunidades identificados en la praxis de la economía circular en diferentes regiones y sectores, e identificar los lineamientos críticos para la planificación de políticas públicas, la definición de modelos de negocio y la consolidación de prácticas comunitarias que fomenten la equidad social y la regeneración ecológica.

En suma, se espera que la investigación evidencie la importancia de combinar enfoques interdisciplinarios y multiactorales para hacer frente a la complejidad inherente al paradigma de la economía circular. Asimismo, se anticipa que la atención a la justicia social y a la participación colectiva en los procesos de toma de decisiones resulte fundamental para garantizar un impacto duradero de las acciones orientadas a la sostenibilidad.

Materiales y Métodos

El presente estudio adopta un diseño documental y descriptivo (Alegre, 2022) orientado a sistematizar y analizar la literatura científica relevante en torno a la economía circular, con énfasis en sus dimensiones filosófico-conceptuales y en la praxis global. A continuación, se detallan las fuentes de información empleadas y los métodos utilizados para la recolección, organización y análisis de los datos.

1. Selección de Fuentes y Bases de Datos

La primera etapa metodológica consistió en la identificación sistemática de fuentes bibliográficas de alto nivel que ofrecieran una visión comprehensiva y plural de la economía circular, tanto en sus facetas conceptuales como prácticas. Para ello, se llevó a cabo una revisión de artículos científicos, monografías, informes técnicos y documentos producidos por organismos internacionales, reconociendo la naturaleza interdisciplinaria y multisectorial de la economía circular. Con el propósito de garantizar la calidad y pertinencia de la evidencia recopilada, se priorizaron bases de datos con amplio reconocimiento y alto impacto en la comunidad académica, tales como Scopus, Web of Science (WoS), ScienceDirect y SpringerLink. Estas plataformas concentran publicaciones arbitradas, sometidas a estrictos estándares de revisión por pares, y abarcan campos diversos como la economía ecológica, la ecología industrial, la ingeniería y las ciencias sociales. Adicionalmente, para capturar la riqueza cultural y las diferencias contextuales que caracterizan la adopción de la economía circular en distintas regiones, se incluyeron documentos redactados en inglés y en español. Este criterio lingüístico amplió el espectro de estudio, posibilitando un análisis multicultural que integra la perspectiva de países del Norte y del Sur global. Dicho enfoque resultó especialmente relevante dado el alcance planetario de la economía circular y las variaciones substanciales en infraestructura, marco regulatorio y sensibilización social entre distintas realidades geográficas. Como directriz general, se buscó incluir literatura que abordará el tema desde múltiples dimensiones —económica, ambiental, social y política— de modo que el corpus final reflejará la diversidad de enfoques y la naturaleza holística del paradigma circular. Esta heterogeneidad documentada se constituyó en un insumo esencial para comprender las tensiones y oportunidades inherentes a la economía circular, así como para sustentar los análisis ulteriores con evidencia contrastada y alineada con la vanguardia del conocimiento.

2. Criterios de Inclusión y Exclusión

Con el objeto de salvaguardar la calidad académica y la pertinencia temática en la delimitación del corpus documental, se establecieron criterios de inclusión y exclusión cuidadosamente diseñados para cubrir la complejidad inherente a la economía circular:

Criterios de Inclusión

- a) Relevancia conceptual: Se admitieron estudios que definieran de manera explícita la economía circular o que examinaran sus facetas filosófico-conceptuales y prácticas, estableciendo un puente entre la teoría y la aplicación empírica.
- b) Rigor editorial: Fueron elegidos artículos de investigación originales, revisiones sistemáticas y capítulos de libro difundidos en revistas o editoriales de prestigio internacional, garantizando la fiabilidad de su contenido y su sometimiento a procesos de revisión por pares.
- c) Evidencia empírica: Se incluyeron trabajos que aportaran datos cuantitativos o cualitativos relativos a la implementación de la economía circular, considerando su repercusión en los ámbitos social y ambiental, a fin de enriquecer la comprensión multifacética del fenómeno.

Criterios de Exclusión

- a) Alcance limitado: Se descartaron textos cuyo enfoque se restringiera a la eficiencia energética o a problemáticas puntuales sin conectar tales aspectos con la economía circular como sistema holístico, evitando así desdibujar la cohesión analítica del estudio.

- b) Déficit metodológico: No se contemplaron documentos que carecieran de rigor investigativo, evidenciado en la ausencia de un diseño metodológico claro o en la insuficiencia de referencias científicas contrastadas, dado que ello comprometería la validez de los hallazgos.
- c) Literatura gris: Con la intención de preservar la legitimidad científica, se excluyó la literatura no arbitrada que no superase un mínimo umbral de confiabilidad. Solo en casos excepcionales, y con fines meramente contextuales, se integraron informes institucionales o técnicos que carecían de revisión por pares, siempre y cuando provinieran de fuentes oficiales reconocidas y resultaran indispensables para contextualizar políticas públicas relevantes.

3. Estrategia de Búsqueda y Palabras Clave

Para articular una prospección bibliográfica exhaustiva en torno a la economía circular, se diseñó una estrategia de búsqueda que incorporó tanto términos controlados como vocablos libres, a fin de garantizar la recuperación de publicaciones con alto nivel de relevancia y rigor. En este sentido, se combinaron los siguientes descriptores: “circular economy”, “economía circular”, “sostenibilidad”, “ecología industrial” y “ecological economics”, seleccionados por su pertinencia para reflejar la complejidad conceptual y las dimensiones multidisciplinares del objeto de estudio. Como medida adicional, se aplicaron filtros de diversa índole para afinar el corpus resultante:

- A. Filtro cronológico: Se priorizaron aportaciones publicadas posteriormente a 2010, reconociendo que la literatura académica sobre economía circular ha experimentado un crecimiento exponencial en la última década, y que los planteamientos más recientes suelen incorporar hallazgos e innovaciones metodológicas más avanzadas.
- B. Filtro idiomático: A fin de captar las contribuciones producidas tanto en contextos anglosajones como hispanohablantes, se restringió la búsqueda a documentos en inglés y español. Esta decisión amplía la diversidad cultural y geográfica de las perspectivas revisadas, permitiendo una aproximación más comprehensiva a la praxis y teoría de la economía circular.
- C. Filtro por tipo de documento: Se incluyeron artículos originales, revisiones en revistas científicas de alto prestigio, así como informes emanados de organismos internacionales reconocidos, con objeto de abarcar tanto el ámbito académico como el institucional.

Además, con miras a reducir el ruido informativo y maximizar la especificidad de la búsqueda, se recurrió al uso sistemático de operadores booleanos (AND, OR, NOT) y de comillas para las frases exactas, lo que posibilitó una recuperación bibliográfica más focalizada en documentos altamente pertinentes. De este modo, la estrategia combinada de vocablos clave, filtros específicos y operadores booleanos permitió depurar eficazmente la gran masa de información disponible, delimitando un conjunto de fuentes robusto y de alta relevancia para la exploración de la economía circular bajo un prisma filosófico-conceptual y de praxis global.

4. Proceso de Revisión y Síntesis Documental

La estrategia de revisión adoptada constó de dos fases secuenciales, concebidas para garantizar tanto la coherencia temática de las fuentes seleccionadas como la profundidad analítica de los hallazgos:

A. Filtraje preliminar y pertinencia temática

En una primera aproximación, se realizó un tamizaje de los documentos recuperados mediante la evaluación de sus títulos y resúmenes, con el fin de confirmar su alineación con la pregunta de investigación y los criterios de inclusión establecidos. Esta labor inicial sirvió para descartar de manera expedita aquellos materiales que no abordaran de manera explícita el paradigma de la economía circular o que carecieran de sustento metodológico y/o teórico.

Durante esta fase, se tuvo especial cuidado en identificar la profundidad conceptual con la cual los textos se ocupaban de las dimensiones filosóficas y prácticas de la economía circular, evitando sesgos temáticos y asegurando la representatividad de la muestra seleccionada.

B. Lectura exhaustiva y construcción de la matriz de análisis

Aquellos documentos que superaron la primera criba se sometieron a una revisión en profundidad, lo que implicó la lectura integral de su contenido. Para sistematizar la ingente cantidad de información, se diseñó una matriz analítica donde se registraron elementos esenciales: objetivos del estudio, métodos de recolección y análisis de datos, hallazgos principales, limitaciones metodológicas y conclusiones.

La comparación transversal de la información recabada permitió identificar confluencias, divergencias y vacíos temáticos, fortaleciendo la triangulación de perspectivas alrededor de la economía circular. Este procedimiento, inspirado en enfoques cualitativos propios de la investigación documental, puso de relieve la coherencia teórica y la robustez metodológica de los distintos aportes.

Ahora bien, se realizó una evaluación crítica de las fuentes, prestando especial atención a la calidad editorial, la solidez epistemológica y la pertinencia socioambiental de los estudios. Este acercamiento holístico incluyó la valoración de los modelos explicativos y las propuestas empíricas presentadas, de cara a discriminar aquellas contribuciones que reforzaran el corpus teórico-práctico de la economía circular y evitar la incorporación de enfoques con rigor insuficiente. Con ello, se logró depurar y organizar la producción científica consultada, cimentando las bases para un análisis integral de la circularidad en diversos contextos y escalas.

5. Análisis de la Información

El procesamiento analítico de la información recopilada se llevó a cabo bajo un enfoque categórico y temático, el cual posibilitó la identificación sistemática de constructos teóricos y elementos críticos que inciden en la economía circular en diversos contextos. Entre los primeros, destacan el diseño regenerativo, los principios de ecología industrial y la innovación sociotécnica, mientras que los segundos abarcan aspectos relacionados con políticas públicas, participación social y barreras tecnológicas, todos ellos decisivos para la aplicación real de la circularidad.

El proceso de análisis se estructuró mediante la clasificación y síntesis de los hallazgos, focalizando la atención en dos grandes ejes:

- I. Dimensiones filosófico-conceptuales: En este apartado se agruparon los estudios que profundizan en la ontología, la epistemología y las implicaciones éticas y políticas de la economía circular, subrayando cómo estos fundamentos marcan el derrotero para su adopción integral.
- II. Casos empíricos: Se asignó un nivel de priorización elevado a la descripción de experiencias concretas en ámbitos industriales, gubernamentales y comunitarios, atendiendo a los procesos de adaptación y a las buenas prácticas sugeridas por la literatura. Así, se pudo comparar el grado de alineación entre las propuestas teóricas y la realidad operativa en distintas escalas de implementación.

Para afianzar la validez interna del análisis, se efectuó un riguroso ejercicio de triangulación, que consideró la convergencia y divergencia de hallazgos provenientes de diferentes autores, metodologías y regiones geográficas. Este enfoque crítico permitió identificar no solo los consensos en torno a la economía circular, sino también las tensiones y discrepancias que persisten, ya sea en cuanto a la configuración teórica del paradigma o en relación con los resultados empíricos observados. Así, se visibilizaron vacíos conceptuales y retos prácticos que demandan mayor investigación y un replanteamiento reflexivo de las estrategias de intervención.

En conjunto, la meticulosa aplicación de estos procedimientos metodológicos —enmarcados en la lectura crítica, la codificación temática y la triangulación— condujo a una sistematización robusta de los aportes existentes sobre la economía circular. Los productos de esta aproximación —mapas conceptuales, matrices de análisis e interpretaciones contrastadas— dotaron de profundidad y cohesión al corpus bibliográfico, habilitando las bases para una discusión crítica ulterior y una interpretación integradora de las implicaciones que la economía circular conlleva para la transformación de los sistemas socioeconómicos.

Resultados y Discusión

1. La economía circular como visión filosófico-conceptual: alcances y vacíos de justicia social

El análisis crítico de la literatura sugiere que la economía circular (EC) se ha posicionado como un paradigma integral que pretende conciliar la expansión económica con la preservación de los recursos naturales y la regeneración de los ecosistemas. Bajo la retórica de los principios regenerativos y restaurativos, la EC se sustenta en el ideal de “cerrar el ciclo” de materiales y energía, desafiando la linealidad propia de la producción y el consumo convencionales (Cervantes, 2021; Preciado *et al.*, 2021). No obstante, la ambigüedad teórica subyacente—derivada de la multiplicidad de definiciones y de la ausencia de un marco epistémico unificado—ha levantado interrogantes acerca de la profundidad y coherencia de sus fundamentos. Esta imprecisión conceptual dificulta la consolidación de la EC como un marco transformador real, pues propicia vacíos normativos que comprometen su capacidad de promover la justicia social, la equidad distributiva y la inclusión de actores históricamente marginados (Villalba, 2024). En este sentido, se observa que la mayoría de los discursos dominantes de la EC—con frecuencia impulsados por visiones tecnocráticas y productivistas—acentúan la eficiencia y la competitividad económica, pero escamotean la discusión acerca de la redistribución de la riqueza, la participación comunitaria y el reconocimiento de las desigualdades estructurales (Cobos, 2024). Esta orientación derivada de la modernidad capitalista, y enraizada en el crecimiento del PIB, termina por invisibilizar las asimetrías de poder y la posibilidad de una transformación radical de los modos de producción. Por consiguiente, la ausencia de referencias explícitas a la dimensión política de la EC—con preguntas fundamentales sobre quiénes participan en la toma de decisiones y quiénes se benefician—pone en evidencia la falta de anclaje filosófico robusto y la necesidad de una reflexión más profunda sobre la agencia de distintos actores (Vier *et al.*, 2021). Aunado a lo anterior, el rol del trabajo y las desigualdades de género emergen como dimensiones críticas que suelen diluirse en el discurso estándar de la EC, reproduciendo patrones de invisibilización y precariedad laboral (Yáñez, 2021). Por ejemplo, las dinámicas de producción “circular” podrían mantener la sobreexplotación de ciertos grupos, o desatender la distribución equitativa de los costos y beneficios en la transición, si no se reconfiguran las relaciones de poder subyacentes. Estos factores dificultan la legitimidad del paradigma, al situar la circularidad más como un imperativo tecnocientífico que como una revisión sistémica de los procesos sociales y económicos (Cantú, 2021). En respuesta a tales carencias, diversos investigadores y colectivos proponen una “economía circular justa” que incorpore una crítica a la desigualdad estructural y adopte una visión holística de la sostenibilidad, la cual incluya los derechos laborales, la paridad de género y la justicia ambiental en un mismo plano de importancia. Este enfoque alternativo enfatiza la necesidad de participación democrática en el diseño regenerativo y en la gestión de los ciclos de materiales, promoviendo la horizontalidad en la gobernanza y la distribución equitativa de los beneficios. Tal perspectiva implica redefinir la propia racionalidad que subyace a la EC, reconociendo la transversalidad de la justicia social como fundamento ineludible para la consolidación de un auténtico cambio sistémico que desdibuje la dicotomía entre crecimiento económico y equidad socioecológica. En ese sentido, la economía circular busca trascender el paradigma lineal hacia uno regenerativo, no obstante, subsisten profundas brechas de justicia social que limitan su consolidación efectiva. La Figura 1 sintetiza los principales desafíos identificados en relación con la inclusión social, equidad distributiva y reconocimiento de actores históricamente marginados en la transición circular, destacando las áreas críticas para una transformación realmente sistémica y equitativa.

2. Implementación global en industrias, gobiernos y comunidades: capacidades institucionales diferenciadas

La revisión crítica de la literatura evidencia que la economía circular (EC) se ha extendido de manera heterogénea a lo largo de distintos continentes y sectores productivos, configurando un mosaico desigual de iniciativas, marcos regulatorios y capacidades institucionales. En el ámbito gubernamental, se distinguen casos paradigmáticos como la Ley de Economía Circular de 2008 en China y los Planes de Acción de la Unión Europea (2015, 2020), instrumentos que han promovido el rediseño de políticas públicas orientadas al cierre de ciclos y a la valorización de residuos (Teixidó, 2022). Esta voluntad política ha catalizado cambios sustantivos en sectores clave, impulsando directrices obligatorias o incentivos económicos que facilitan la adopción de prácticas circulares en la industria. En particular, se registra una progresiva “circularización” en rubros como el automotriz, la electrónica y la gestión de residuos, donde el desarrollo de la remanufactura, la simbiosis industrial y los modelos de negocio basados en la servitización ha reportado mejoras en la eficiencia de recursos, así como la disminución de la huella medioambiental. No obstante, este impulso gubernamental e industrial contrasta con la realidad de otros contextos, sobre todo en el Sur global o en países con menor solidez institucional, en los que la transición circular permanece en un estadio embrionario o se lleva a cabo de

manera transplantada —importando políticas y estrategias externas sin adecuarlas a las condiciones específicas de infraestructura, cultura organizacional o marcos normativos locales. Tal falta de adaptación contextual conduce a resultados desiguales, donde el potencial transformador de la EC se ve coartado por barreras como la carencia de financiamiento, la escasez de mecanismos de control regulatorio y la debilidad del capital humano calificado para operar tecnologías limpias o diseñar esquemas de producción y consumo circulares. Estos desniveles institucionales subrayan la magnitud de la brecha entre regiones con alta capacidad de gobernanza —más propensas a asimilar los principios de la EC— y aquellas cuyas dinámicas socioeconómicas se rigen por precariedad y dependencia de modelos lineales heredados. En consecuencia, la literatura advierte que la cooperación internacional debe ir más allá de transferir políticas “prefabricadas” desde economías avanzadas, requiriendo un flujo bidireccional de conocimiento que promueva la experimentación local y la cocreación de soluciones contextualmente pertinentes (Bravo & Merchán, 2023). Esto implica la conformación de redes Sur-Sur y Norte-Sur basadas en la horizontalidad y la reciprocidad, donde la experiencia práctica y los saberes endógenos se integren al debate sobre innovación sociotécnica y regeneración ambiental. De igual forma, se enfatiza la necesidad de fortalecer los sistemas educativos y de formación técnica, tanto en el sector público como privado, para que el personal directivo y operativo cuente con herramientas robustas que faciliten la transición circular. Asimismo, se remarca la relevancia de articular políticas de estímulo económico —por ejemplo, incentivos fiscales o subsidios específicos para proyectos circulares— con reformas institucionales que normalicen la producción y el consumo sostenibles en la estrategia de desarrollo nacional o regional (Da Costa Pimenta, 2022). En síntesis, la implantación global de la economía circular —aunque incipiente en determinadas regiones— demuestra la plasticidad de este enfoque en distintos entornos industriales y gubernamentales, al tiempo que revela la centralidad de la capacidad institucional para allanar el camino de la transición. El desafío inminente radica en orquestar un proceso de aprendizaje colectivo que, mediante la colaboración intersectorial y el fortalecimiento de la gobernanza, integre tanto los avances de países pioneros como el potencial transformador de regiones emergentes. Solo con la articulación efectiva de recursos, políticas, marcos normativos, competencias técnicas y participación social podrá la EC consolidarse como un paradigma funcional en las múltiples realidades globales, cristalizando sus principios regenerativos en la transformación sistémica de los sectores productivos y las comunidades. La implementación global de la economía circular presenta una marcada heterogeneidad debido a diferencias significativas en capacidades institucionales y contextos regionales. La Figura 2 ilustra el ciclo general de implementación circular en contextos industriales, gubernamentales y comunitarios, resaltando las etapas clave y las disparidades entre regiones con alta capacidad institucional y aquellas con limitaciones estructurales.



Figura 1. Desafíos para la Justicia Social en la Economía Circular

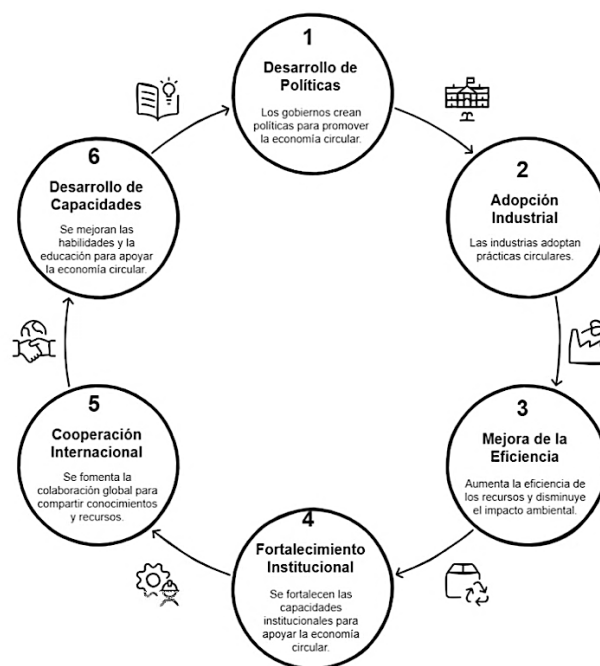


Figura 2. Ciclo de Implementación de la Economía Circular.

3. Barreras estructurales para la transición circular y oportunidades de innovación sociotécnica

La literatura especializada converge en señalar que la economía circular (EC), pese a sus numerosos méritos teóricos y a su creciente aceptación en el ámbito político-empresarial, se enfrenta a barreras estructurales que ralentizan su progresión desde la retórica a la práctica efectiva. Estas limitaciones, de naturaleza variada —cultural, económica, institucional y regulatoria—, conforman un entramado complejo en el cual las inercias lineales se perpetúan. Por un lado, existe un déficit de concienciación ciudadana, reflejado en hábitos de consumo indiferentes a la huella ecológica y una escasa demanda de productos o servicios circulares. En paralelo, diversas organizaciones, habituadas a la linealidad de los procesos industriales, exhiben resistencia al cambio por temor a la alteración de sus modelos de negocio, a la incertidumbre regulatoria o a potenciales pérdidas de rentabilidad a corto plazo (Sandoval & Araya, 2024). Por ende, resulta destacable la ausencia de indicadores de circularidad verdaderamente integrales y globalmente consensuados, lo cual dificulta la evaluación objetiva de los avances y entorpece la comparación sistemática entre sectores y países. A ello se suma la carencia de infraestructuras apropiadas para la logística inversa y la industrialización del reciclaje, un eslabón fundamental para cerrar los ciclos de materiales. En este marco, la literatura reporta la existencia de subsidios perversos que continúan incentivando la extracción de recursos vírgenes, sumados a la ausencia de enfoques fiscales que penalicen la contaminación o la generación de desechos. De este modo, el statu quo lineal recibe soporte gubernamental, limitando la competitividad de las soluciones circulares emergentes. Con todo, estas dificultades estructurales no solo revelan la magnitud del desafío, sino que también actúan como catalizadores de la innovación sociotécnica. Por ejemplo, la simbiosis industrial se erige como un modelo ejemplar que conecta flujos de energía y materiales entre empresas de un mismo enclave, transformando el “desecho” de una entidad en insumo para otra, con beneficios ambientales y económicos. A su vez, la adopción de tecnologías habilitadoras provenientes de la Industria 4.0 —tales como blockchain, Internet of Things (IoT) e impresión 3D— abre horizontes inexplorados para optimizar la trazabilidad de los materiales, promover la logística inversa avanzada y facilitar el rediseño de productos bajo criterios de modularidad y reusabilidad (ILO.ORG). Paralelamente, los modelos de negocio circulares, como Product-as-a-Service, fomentan la servitización y la prolongación de la vida útil de los bienes, desatando nuevas dinámicas de oferta y demanda basadas en la eficiencia de recursos. En conjunto, este proceso dialéctico entre barreras y oportunidades consolida la visión de la economía circular como un proyecto de cambio sistémico, requiriendo la convergencia de esfuerzos gubernamentales, empresariales y sociales para propiciar un entorno que favorezca la transición. Las barreras culturales, económicas e institucionales, lejos de constituir meros obstáculos, ofrecen la ocasión de repensar las lógicas de producción y consumo, encauzando la creatividad y el liderazgo compartido hacia propuestas disruptivas que, cimentadas en la colaboración intersectorial y la co-creación, encaucen la actividad económica hacia escenarios de regeneración y equilibrio ecológico. Por tanto, la adopción efectiva de la economía circular enfrenta barreras estructurales importantes que condicionan su avance práctico. En la figura 3 se representa la dinámica entre dichas barreras (culturales, económicas, regulatorias) y las oportunidades emergentes de innovación sociotécnica, subrayando cómo estas tensiones pueden transformarse en catalizadores de cambio sistémico hacia una economía realmente circular.

4. Vinculación entre principios teóricos y praxis: estrategias, reflexiones y agenda futura

La revisión documental converge en señalar una brecha sustantiva entre la formulación filosófico-conceptual de la economía circular (EC) y su materialización operativa en los diversos ámbitos de producción, consumo y gobernanza. A pesar de que los preceptos de la EC —diseño sin desperdicio, regeneración de sistemas naturales, jerarquía de las 3R-10R— delinean una ruta transformadora, su ejecución en la práctica se ve obstruida por un conjunto de factores estructurales, incluidos la lógica del beneficio a corto plazo, las inercias institucionales y las tensiones sociopolíticas que influyen en la adopción de cambios disruptivos. Estas limitaciones subrayan la urgencia de aterrizar principios circulares en mecanismos de gobernanza robustos, políticas públicas coherentes y procesos de formación que fomenten la cultura de circularidad más allá del plano discursivo. De cara al futuro, emergen diversas estrategias que pueden reforzar la vinculación teoría-práctica. En primer lugar, la literatura examina el potencial de los estudios comparados que analicen la implementación de la EC en distintos contextos geográficos —Norte-Sur, economías desarrolladas vs. emergentes— y sectores productivos, en aras de identificar las buenas prácticas y las limitaciones contextuales que afectan su replicabilidad. Conjuntamente, se destaca la relevancia de metodologías mixtas, capaces de combinar análisis cuantitativos (indicadores de circularidad, evaluación de flujos materiales y energéticos) con aproximaciones cualitativas (estudios de caso, etnografías industriales), brindando así una visión poliédrica de la transición circular. En segundo lugar, se promueve la investigación-acción participativa y la cocreación en espacios de innovación

colaborativa, tales como los living labs, donde actores locales —comunidades, empresas, autoridades— codiseñan y validan soluciones ancladas en las realidades socioculturales de cada territorio. Este enfoque participativo otorga legitimidad y apropiación a las iniciativas de EC, facilitando tanto la traducción de los principios regenerativos en intervenciones factibles como la adopción de prácticas cotidianas que cuestionen los patrones lineales de producción y consumo. En este sentido, se subraya la importancia de analizar relaciones socioecológicas a escala micro, involucrando tanto a comunidades de base como a sistemas naturales específicos, para lograr la internalización de la circularidad en la vida diaria y la protección de los bienes comunes. Desde una perspectiva política, el entramado epistemológico y práctico de la EC demanda miradas transdisciplinarias y enfoques críticos que reconozcan las desigualdades estructurales en la distribución de recursos y en la capacidad de innovar. Esto incluye la atención a dinámicas de poder y la adopción de posturas éticas y ambientales consistentes, con la finalidad de sortear el riesgo de que la economía circular se instrumentalice únicamente como herramienta de crecimiento económico. Por tanto, el fortalecimiento de marcos legislativos que incentiven la transición y la implementación de métricas transparentes y estandarizadas resulta esencial para consolidar la EC como un paradigma transformador. Solo así, mediante la confluencia de acciones multiactorales, la participación comunitaria y la voluntad política, se logrará materializar una economía circular incluyente, equitativa y fiel a sus principios regenerativos, desplegando todo su potencial para reconfigurar la relación entre la sociedad y los sistemas naturales. Finalmente, la articulación entre principios filosóficos y la praxis operativa continúa siendo un desafío central para la economía circular. La figura 4 sintetiza de forma visual y sistemática diversas estrategias recomendadas por la literatura para estrechar la brecha teoría-práctica, proponiendo enfoques comparados, metodologías mixtas y participación comunitaria como vías para lograr una implementación efectiva y contextualizada del paradigma circular.

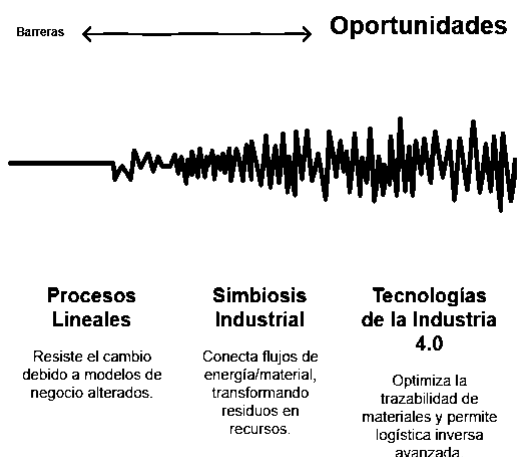


Figura 3. Transición hacia la Economía Circular.

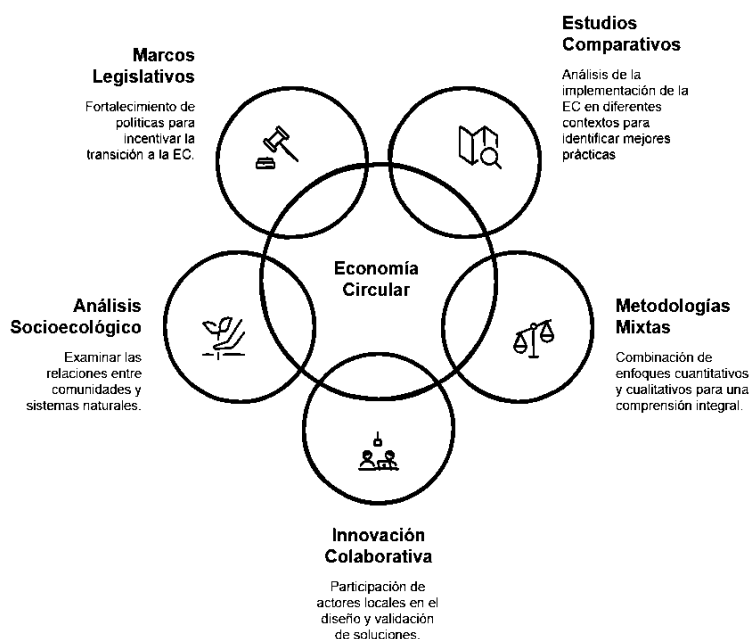


Figura 4. Estrategias para la Implementación de la Economía Circular.

Conclusiones

El balance de la literatura analizada, así como el debate emergente en torno a las vertientes filosóficas y prácticas de la economía circular (EC), permiten concluir que este paradigma no se reduce a una serie de ajustes técnicos en la gestión de materiales y energía, sino que implica una reconfiguración sistémica de los fundamentos socioeconómicos, culturales e institucionales. A partir de la pregunta de investigación planteada en la introducción —que inquiere sobre la incidencia de los principios filosófico-conceptuales de la EC en la efectividad de sus estrategias de implementación a escala global, atendiendo a la diversidad de contextos—, se desprenden las siguientes aportaciones:

Carácter ontológico y filosófico

La EC trasciende la mera optimización de recursos al postular una visión ontológicamente distinta al patrón lineal “tomar-hacer-desechar”. Sus principios fundacionales (diseño regenerativo, reducción de la entropía, responsabilidad extendida) conforman un marco epistemológico en permanente evolución, donde el componente ético e integración de dimensiones como la justicia social adquieren relevancia. Las críticas esbozadas desde la ecología política y los enfoques decoloniales subrayan la urgencia de un abordaje holístico que considere la equidad y pluralidad cultural en la puesta en práctica de la circularidad. Sin este componente, la EC corre el riesgo de permanecer limitada a una retórica tecnocrática, sin un potencial transformador auténtico.

Multidimensionalidad de la implementación

El estudio revela que los aspectos técnicos, aunque esenciales (p. ej., tecnologías limpias, rediseño de productos), resultan insuficientes para sostener una transición sistémica de gran escala. La interacción de factores institucionales (gobernanza, regulación), económicos (incentivos fiscales, financiamiento) y socioculturales (movilización de actores, cultura organizacional) determina el éxito o el estancamiento de los proyectos circulares. En consecuencia, la variabilidad en velocidad y profundidad de la adopción de la EC se vincula estrechamente con capacidades institucionales y el grado de innovación sociotécnica disponible en cada región. Se refuerza así la necesidad de una planificación multinivel, en la que converjan esfuerzos estatales, empresariales y comunitarios.

Barreras estructurales y oportunidades de innovación

La consolidación de la EC enfrenta obstáculos de orden estructural, entre los que se cuentan la resistencia cultural al cambio de patrones lineales de producción y consumo, la desigual distribución de poder y recursos, y los marcos regulatorios fragmentados o poco propicios para la eco-innovación. No obstante, estos desafíos han incentivado la generación de oportunidades de innovación sociotécnica (simbiosis industrial, digitalización, servitización), potenciadas por la colaboración intersectorial y la articulación de redes globales de aprendizaje. Se vislumbran, así, caminos emergentes que apuntan a la reconfiguración de las cadenas de valor y la materialización efectiva de la circularidad.

Vinculación entre teoría y praxis

El distanciamiento entre la formulación teórica de la EC y su materialización práctica persiste como un reto central. La literatura apunta a la necesidad de investigaciones transdisciplinarias, metodologías mixtas y enfoques participativos que involucren, de forma integral, a las comunidades y fortalezcan la legitimidad de las acciones circulares sobre el terreno. La contextualización de principios circulares en función de las especificidades históricas, culturales y ambientales de cada territorio constituye una estrategia indispensable para superar la retórica y lograr intervenciones con efectos duraderos.

Horizontes futuros y agenda de investigación

Se plantea una ampliación del debate que incorpore la justicia ambiental, los derechos socioeconómicos y la participación ciudadana, trascendiendo enfoques meramente instrumentales o economicistas. En esta línea, la EC podría converger con visiones de sustentabilidad radical, orientadas a la redistribución estructural de beneficios y al empoderamiento de actores vulnerables. La colaboración Sur-Sur y Norte-Sur, articulada a través de redes de investigación y prácticas internacionales, se erige como un factor clave para intercambiar saberes y co-crear soluciones ajustadas a contextos institucionales disímiles. Sumado a ello, la adopción de investigación-acción participativa reforzará la pertinencia y la apropiación social de las iniciativas circulares.

Finalmente, la economía circular emerge como un paradigma en transformación cuyo éxito demanda una síntesis crítica de rigor conceptual y flexibilidad operativa, combinada con un reconocimiento genuino de las desigualdades históricas y la diversidad de realidades locales. Sólo mediante la apertura inclusiva, la atención a la justicia social y la construcción de alianzas estratégicas con gobiernos, empresas y comunidades será posible trascender la etapa declarativa e instaurar un sistema productivo y cultural alineado con los límites planetarios y la dignidad humana. De este modo, la EC podrá transitar de la teoría a la realidad tangible, encauzando los procesos económicos en una senda regenerativa, equitativa y sostenible.

Agradecimiento: los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico Superior de Zongolica por las facilidades otorgadas para investigar.

Bibliografía

- Alegre Brítez, M. Á. (2022). Aspectos relevantes en las técnicas e instrumentos de recolección de datos en la investigación cualitativa. Una reflexión conceptual. http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2076-054X2022005400093
- Bravo Betancourt, K. N., & Merchán Pauta, M. C. (2023). Propuesta de Proyecto de Cooperación Internacional para fomentar la economía circular en Austrobox (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay). <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13586>
- Cantú-Martínez, P. C. (2021). Economía circular para la sustentabilidad. *Revista CienciaUANL*, 24(106), 66–71. <https://cienciauanl.uanl.mx/ojs/index.php/revista/article/view/202>
- Carrillo González, G., & Pomar Fernández, S. (2021). La economía circular en los nuevos modelos de negocio. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 9(23). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2021.23.79933>
- Cervantes, G. (2021). Transitando a la economía circular en el sector agropecuario: granjas experimentales en Guanajuato, México. *Revista Kawsaypacha: sociedad y medio ambiente*, (7), 45–66. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202101.003>
- Cobos Floriano, S. (2024). Indicadores financieros en el modelo de economía circular. Instituto de Ciencias Sociales y Administración. <https://cathi.uaci.mx/20.500.11961/29653>
- Cortez, D. (2021). Sumak kawsay y buen vivir, ¿dispositivos del desarrollo? Ética ambiental y gobierno global. *FLACSO Ecuador*. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/58783.pdf>
- Da Costa Pimenta, Clayton Cosme. (2022). La Economía Circular como eje de desarrollo de los países latinoamericanos. *Revista Economía y Política*, (35), 1–18. http://scielo.senecyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2477-90752022000100001&lng=es&tlng=es
- García, A. C. (2022). Economía circular versus economía lineal. Propuestas normativas en España y Francia relativas al uso de envases y a la información dirigida al consumidor sobre cualidades ambientales de los productos. *Revista CESCO de Derecho de Consumo*, (42), 19–52. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8474086>
- Gómez-Rodríguez, D. T., & Barboza-Pérez, E. M. (2022). ¿Es posible el diálogo entre la economía ecológica y la economía solidaria? *Revista iberoamericana de bioeconomía y cambio climático*, 8(15), 1797–1805. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i15.14052>
- Imberón Díaz, A. L., & Souto Anido, L. (2023). Innovación y economía circular, un binomio perfecto. *Economía y Desarrollo*, 167(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0252-85842023000200007&script=sci_arttext&tlng=pt
- Kovacic, Z. (2021). Contradicciones y promesas de la economía circular. *Oikonomics: Revista de economía, empresa y sociedad*, (16), 1–8. https://oikonomics.uoc.edu/divulgacio/oikonomics/recursos/documents/16/kovacic_Oikonomics16_cat.pdf
- Lima, I. L. P. (2022). Inovação nas rotas tecnológicas para a implantação da Ecologia Industrial e Economia Circular no Setor Têxtil do Agreste de Pernambuco: estudo de preceitos para a sustentabilidade setorial. <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/9158>
- Medina-Abad, J., & Freire-Pesántez, A. (2023). Barreras para la implementación de la economía circular en países en vías de desarrollo. *Estudios de la Gestión*, (14), 101–123. <https://doi.org/10.32719/25506641.2023.14.6>
- Mendoza-Rangel, J. M., & Díaz-Aguilera, J. H. (2023). Economía circular en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos. *Revista ALCONPAT*, 13(3), 328–348. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i3.697>
- Melendez, J. R., Delgado, J. L., Chero, V., & Rodríguez, J. F. (2021). Economía circular: una revisión desde los modelos de negocios y la responsabilidad social empresarial. *Revista Venezolana de Gerencia: RVG*, 26(6), 560–573. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8890603>
- Nieves Mendoza, L. M., & Morales Cely, W. A. (2022). Una mirada a la brecha entre actitud y comportamiento del consumidor en la economía circular. *Tendencias*, 23(1), 372–394. <https://doi.org/10.22267/rtend.222301.194>
- Preciado, M. L. C., Beltrán, L. S., & Díaz, B. B. (2021). Economía circular y su situación en México. *Indiciales*, 1(1), 25–37. <https://doi.org/10.52906/ind.v1i1.7>
- Sandoval-Álvarez, C., & Araya, J. D. B. (2024). Modelos de negocios y economía circular: Grado de circularidad y adaptaciones en los modelos. *Yulök Revista de Innovación Académica*, 8(1), 102–122. <https://doi.org/10.47633/azagr997>
- Teixidó, L. S. (2022). La prevención de residuos: comentario a los artículos 17, 18 y 19 de la Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una economía circular. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, (21), 181–216. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8509597>
- Toapanta, A. R. R. (2023). Daño ambiental y economía circular en la explotación de los recursos naturales no renovables. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 16(2), 93–105. <https://doi.org/10.29166/revfig.v16i2.4104>
- Vélez, L. E. M. (2021). Aportes conceptuales de la economía social y solidaria a la economía circular. *Cuadernos de Administración*, 37(70), e5010824–e5010824. <https://doi.org/10.25100/cdea.v37i70.10824>
- Vier, M. B., Schreiber, D., Froehlich, C., & Jahno, V. D. (2021). Reflexões sobre a economia circular. *COLÓQUIO—Revista do Desenvolvimento Regional*, 18(4, out/dez), 27–47. <https://doi.org/10.26767/2206>
- Villalba-Eguiluz, U. (2024). La economía circular y las economías transformadoras. Alcances y tensiones en el País Vasco. *CIRIEC-España, revista de economía pública, social y cooperativa*, (112), 231–256. <https://doi.org/10.7203/CIRIEC-E.112.28299>
- Yáñez, P. P. (2021). Viabilidad de la economía circular en países no industrializados y su ajuste a una propuesta de economías transformadoras. Un acercamiento al escenario latinoamericano. *CIRIEC-España, revista de economía pública, social y cooperativa*, (101), 289–323. <https://doi.org/10.7203/CIRIEC-E.101.15979>

Conversión de Vehículos de Combustión Interna a Eléctricos: Impacto Socioeconómico, Ambiental y en Salud Pública en la Megalópolis Mexicana

Ismael Cervantes-de Anda, Alberto Jesús Alcántara-Méndez, Raúl Santillán-Luna y Felipe de Jesús Figueroa-del Prado *

Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Computación, Escuela Superior de Cómputo, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

* Autor de correspondencia: ffigueroa@ipn.mx; Tel.: 525534230952

Desarrollo Sustentable (Optimización de Procesos Energéticos)

Recibido: 11 de abril de 2025

Aceptado: 28 de junio de 2025

Publicado: 6 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.425>

Resumen: El desarrollo y la comercialización global de vehículos de combustión interna desde principios del siglo XX, ha provocado que los niveles de contaminación atmosférica aumenten gradualmente, convirtiéndose en un problema mundial debido a los efectos en la salud que esto conlleva. Según T. A. Ghebreyesus, director general de la OMS: "La contaminación del aire es una amenaza para la salud en todos los países, pero afecta más a las personas de países de ingresos bajos y medios". México resulta evidentemente afectado por estos niveles de contaminación ambiental. De acuerdo con el Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, los principales contaminantes conocidos como GEI (Gases de Efecto Invernadero), que se emiten a la atmósfera y que son considerados importantes por sus efectos en el cambio climático, son producidos por vehículos con motores de combustión interna. Además, entre los meses de abril y junio suelen registrarse altos niveles de contaminantes generados por concentraciones elevadas de partículas que, debido a la falta de lluvias y al calor estacional, convierten esta temporada en un período muy peligroso para la población, ya que los contaminantes no se dispersan fácilmente, dando lugar a contingencias ambientales. El uso de vehículos eléctricos se propone como una solución tanto para mejorar la calidad del medio ambiente como para que la población que los utilice obtenga beneficios económicos. Para que esta solución propuesta sea masiva y represente un incentivo tanto para el medio ambiente como para el bolsillo de los ciudadanos, es necesario convertir automóviles de combustión interna a vehículos 100% eléctricos, especialmente en automóviles con una antigüedad de al menos 10 años, ya que existe un gran número de estos vehículos circulando diariamente. Además, la gran mayoría de los habitantes no cuentan con la capacidad económica para adquirir un vehículo eléctrico nuevo. También se propone que tanto empresas privadas como entidades gubernamentales que cuentan con flotas de autos utilitarios accedan a este proceso de conversión. De esta manera, un mayor número de habitantes contribuirá a reducir la emisión de contaminantes al aire que respiramos y generará ahorros al dejar de consumir combustibles fósiles.

Palabras clave: Vehículo eléctrico, retrofit, contaminación, movilidad sostenible, políticas públicas.

Conversion of Internal Combustion Engine Vehicles to Electric: Socioeconomic, Environmental, and Public Health Impacts in the Mexican Megalopolis

Abstract: The development and global commercialization of internal combustion engine vehicles since the early 20th century has caused atmospheric pollution levels to gradually increase, becoming a worldwide problem due to its health impacts. According to T.A. Ghebreyesus, Director-General of WHO: "Air pollution is a health threat to all countries but affects people in low- and middle-income countries the most." Mexico is clearly impacted by these environmental pollution levels. According to Mexico's National System of Environmental Information and Natural Resources, the main pollutants known as GHGs (Greenhouse Gases), which are emitted into the atmosphere and considered significant for their climate change effects, are produced by internal combustion engine vehicles. Additionally, between April and June, high levels of pollutants from concentrated particulate matter are typically recorded. Due to lack of rainfall and seasonal heat, this period becomes particularly dangerous for the population as pollutants don't disperse easily, leading to environmental emergencies. The use of electric vehicles is proposed as a solution both to improve environmental quality and provide economic benefits to users. For this solution to achieve mass adoption and serve as an incentive for both environmental protection and citizens' finances, converting gasoline-powered vehicles to 100% electric vehicles is essential - particularly for cars at least 10 years old, given the large number of such vehicles in daily circulation. Furthermore, most residents cannot afford new electric vehicles. The proposal also includes encouraging both private companies and government entities with utility vehicle fleets to adopt this conversion process. This approach would enable more people to help reduce airborne pollutant emissions while generating savings from discontinued fossil fuel consumption.

Keywords: Electric vehicles, retrofit, pollution, sustainable mobility, public policies.

Introducción

En los últimos diez años, la degradación de la calidad del aire ha emergido como uno de los mayores desafíos para la salud pública global. La exposición crónica a contaminantes atmosféricos se ha vinculado científicamente con el desarrollo de patologías graves, incluyendo trastornos cardiovasculares, accidentes cerebrovasculares, enfermedades pulmonares obstructivas y diversos tipos de neoplasias. Datos alarmantes de la Organización Mundial de la Salud revelan que prácticamente la totalidad de la población mundial (99%) habita en zonas donde se exceden los límites recomendados de contaminantes, situación que contribuye a aproximadamente siete millones de defunciones prematuras cada año.

Efectos de la contaminación debido al transporte que utiliza combustibles fósiles

En nuestro país durante las últimas 2 décadas a partir del año 2000, el total de emisiones de CO₂ tienen un registro al alza, representando el sector transporte el que más aporta al medio ambiente, seguido de la generación de energía eléctrica, interpretado por el sector energético. El predominio del sector transporte sobre todo terrestre, en la huella de carbono queda evidenciado en el gráfico de emisiones históricas por sector económico (Figura 1), donde se identifican las fuentes de contaminación atmosférica por CO₂ en el contexto nacional (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2024).

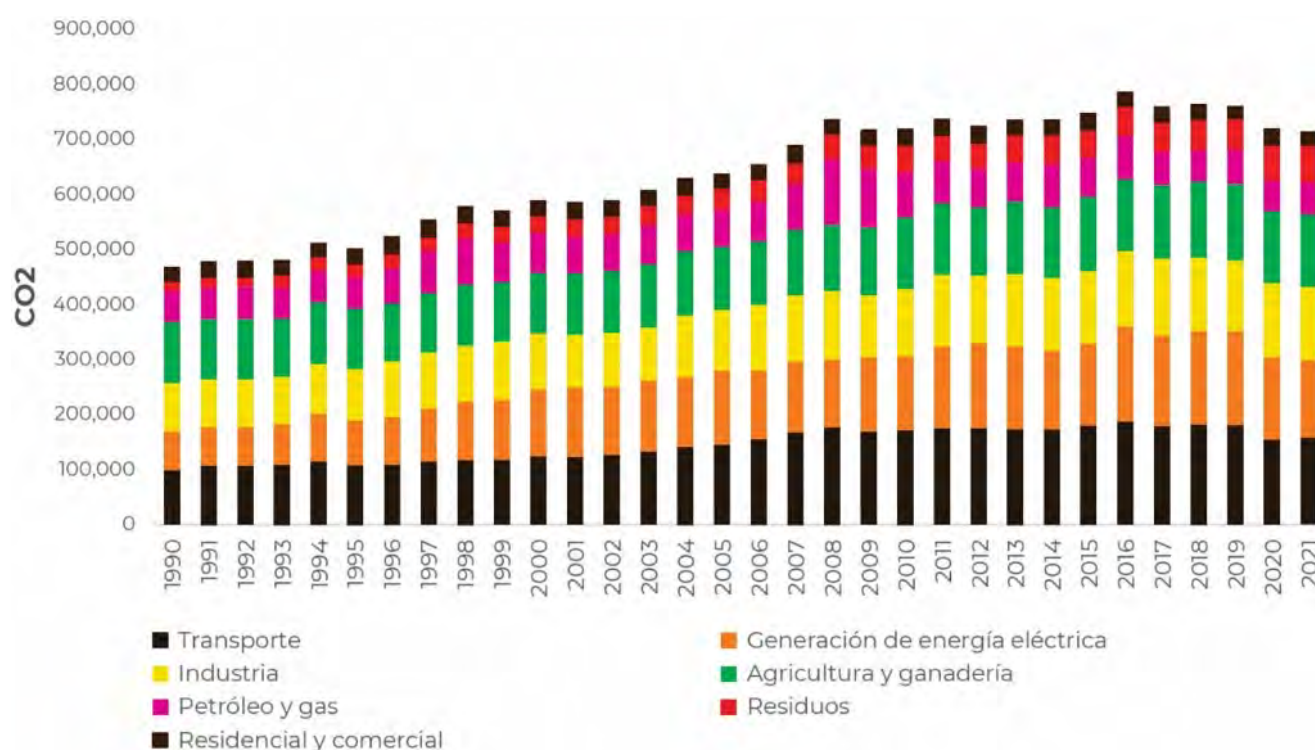


Figura 1. Emisiones históricas por sector económico (Fuente Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC)

De entre todos los sectores económicos, es el del transporte que representa un caso único y preocupante ya que su aportación a la emisión de gases de efecto invernadero han mostrado un crecimiento en los últimos 20 años, junto con la generación de energía eléctrica, en comparación con los demás sectores que prácticamente se han mantenido en los mismos niveles desde 1990. El aumento de la emisión de gases de efecto invernadero en los sectores antes mencionado, se atribuye al crecimiento demográfico y la expansión constante de la demanda de movilidad.

La emisión de gases de efecto invernadero en el sector transporte continua con una tendencia al alza, ya que el 95% del desplazamiento de pasajeros se realiza vía terrestre, junto con un 79.7% de la movilización de carga en 2021. Ambos tipos de transporte continúan empleando combustibles fósiles como fuente energética, y solo un 0.5% de las ventas fueron de autos eléctricos (Climate Transparency, 2022).

Transporte de pasajeros con división modal*

(% de pasajeros-km): vía terrestre, ferroviaria y aérea



Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2021

Transporte de carga con división modal*

(división modal en millones de toneladas-km)



Debido a la disponibilidad de datos, las gráficas solo incluyen carretera y el transporte ferroviario en la categoría de transporte de mercancías. Otros modos de carga, por ejemplo los fluviales, fueron excluidos debido a falta de datos para todos los países

SCT, 2019

*Estos datos no son necesariamente comparables con los datos de otros miembros del G20.

Figura 2. Porcentaje de utilización de los medios de transporte. (Fuente Climate Transparency)

Efectos de la contaminación debido al transporte en México

La contaminación vehicular representa un desafío multidimensional con repercusiones tanto globales como locales, situación particularmente crítica en México donde el sector transporte contribuye con el 20.4% de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero. De esta cifra, el subsector automotor es responsable del 16.2%, siendo los viajes en vehículos particulares el principal factor contaminante. Esta problemática adquiere mayor gravedad en zonas urbanas como el Valle de México, donde las emisiones vehiculares representan aproximadamente el 60% de las partículas suspendidas (PM-10) y están vinculadas a 14,700 muertes anuales por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud. El crecimiento acelerado del parque vehicular, que actualmente consume el 48.2% de la energía nacional -principalmente a través de gasolinas y naftas (71.5% del sector)-, no solo deteriora progresivamente la calidad del aire, sino que genera costos económicos sustanciales. Estudios recientes indican que el impacto de estas externalidades negativas podría alcanzar hasta el 6% del PIB a escala nacional, con pérdidas cercanas al 4% en las principales zonas metropolitanas que albergan al 40% de la población urbana. Particularmente preocupante resulta el caso del transporte privado, responsable del 18% de las emisiones de CO₂ en el Valle de México, cuyos efectos se extienden más allá de lo local al contribuir significativamente al calentamiento global. Esta situación evidencia la urgente necesidad de implementar políticas públicas integrales que aborden tanto los factores ambientales como los socioeconómicos asociados a la movilidad urbana insostenible.

Tabla 1. Externalidades asociadas al uso del automóvil en las principales zonas metropolitanas.
(Fuente ITDP con datos del INEGI)

México. Estimación de externalidades asociadas al uso del automóvil en zonas metropolitanas seleccionadas, 2009 (Millones de pesos)						
Zona Metropolitana	Contaminación local	Cambio climático	Accidentes	Congestión	Ruido	Total
Valle de México	14,396	6,718	10,332	81,163	8,320	121,930
Monterrey	2,282	1,065	5,843	11,485	1,319	21,994
Guadalajara	2,795	1,304	4,970	10,635	1,615	21,319
Puebla-Tlaxcala	990	465	1,317	1,894	575	5,241
León	506	236	1,250	321	293	2,606
Total	20,975	9,787	23,712	106,498	12,123	173,095

Materiales y Métodos

Efectos socioeconómicos y ambientales en la megalópolis

Desde principios del siglo XX, el uso masivo de vehículos de combustión interna ha provocado un aumento en la contaminación del aire, convirtiéndose en un problema global que afecta especialmente la salud en países de ingresos bajos y medios, como México. Según la OMS, estos países sufren más por la contaminación (Organización Mundial de la Salud, 2021).

En México, los principales contaminantes (como los gases de efecto invernadero) provienen de los autos con motor de combustión. Entre abril y junio, las altas temperaturas y la falta de lluvia empeoran la calidad del aire, generando contingencias ambientales peligrosas para la población.

Como solución, se propone impulsar el uso de vehículos eléctricos, no solo para mejorar el medio ambiente, sino también para generar ahorros económicos. En especial, se busca convertir autos de más de 10 años —que circulan en malas condiciones— en autos 100% eléctricos, ya que muchas personas no pueden comprar un vehículo eléctrico nuevo. También se recomienda que empresas y entidades de gobierno transformen sus flotillas. Así, más personas podrían ayudar a reducir emisiones contaminantes y ahorrar al dejar de usar combustibles fósiles.

En línea con los compromisos internacionales de México, la Secretaría de Economía, a través del Centro Nacional de Contacto, promueve prácticas empresariales sostenibles siguiendo los lineamientos de la OCDE. Estas guías buscan alinear las actividades corporativas con las políticas nacionales, fortalecer la confianza con la sociedad y contribuir al desarrollo sustentable.

La propuesta de conversión vehicular refleja estos principios: modernizar autos viejos para que usen motores eléctricos, priorizando que esto sea económicamente viable, especialmente en las grandes ciudades. Así, se combate la contaminación y se facilita el acceso a tecnologías limpias para más personas.

Efectos socioeconómicos

De acuerdo con el INEGI, hasta el mes de mayo de 2022, en México existe un parque de 50,347,569 de vehículos de motor registrados en circulación, de donde 34,687,283 (69%) de unidades corresponden a automóviles y el resto se dividen en camiones de pasajeros y de carga. Respecto a nivel de entidades federativas, el estado que mayor cantidad de automóviles tiene es el Estado de México con 6,347,586 de automóviles, seguido de la Ciudad de México con 5,535,792 y, en tercer lugar, el estado de Jalisco con 2,369,351 de automóviles, de los cuales 40,230,000 usan gasolina, según el Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía. La situación es altamente grave si se considera que entre 1980 y 2020 el número de vehículos debidamente registrados y en circulación en México se multiplicó más de ocho veces, pasando de 6 millones a 50 millones.

Ante las situaciones anteriormente mencionadas, la principal solución que existe hasta el momento, es el que absolutamente todos los vehículos de la llamada megalópolis, formada por los estados de México, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala, Morelos y la Ciudad de México, sean sometidos a un proceso de verificación vehicular, a partir del cual se determina el nivel de partículas generadas por cada vehículo y, a partir de esta evaluación, se establece cuáles vehículos tienen permitido circular diariamente y cuáles no, solución que hasta el momento no ha sido suficiente para disminuir la problemática y, mucho menos, revertir el grave daño ambiental al que se ha llegado.

La solución propuesta a través del presente proyecto de innovación, es reemplazar gradualmente el parque vehicular constituido por vehículos de combustión interna, por vehículos eléctricos a través de un proceso de conversión, a un costo competitivo orientado a la población mayoritaria del país y a empresas que cuentan con flotillas de vehículos utilitarios, con la finalidad de motivar a los usuarios a contribuir con la disminución de emisiones contaminantes al medio ambiente ya que los vehículos totalmente eléctricos no emiten ninguna de las partículas anteriormente mencionadas.

Otro dato importante de considerar es el público al que está dirigido el prototipo de conversión, se trata de la población mayoritaria que no puede comprar un auto de lujo que ya cuenta con un motor híbrido, pues de acuerdo con Statista Research Department, en México para 2020 los autos de este tipo ascendían a 35,911 unidades mientras que en 2021 estos fueron seguidos por los híbridos enchufables con cerca de 2,500.

El impacto socioeconómico de esta transformación resulta particularmente valioso para familias de ingresos medios y bajos, para quienes la adquisición de vehículos híbridos o eléctricos nuevos representa una barrera económica insuperable. La conversión de unidades existentes emerge como una alternativa viable que combina:

- Accesibilidad económica: Costos significativamente menores que la compra de un vehículo nuevo
- Beneficio ambiental: Reducción inmediata de emisiones contaminantes
- Inclusión tecnológica: Democratización de la movilidad sustentable

Tabla 2. Comparación de gasto de gasolina contra electricidad (elaboración propia)

Concepto	Moto 250 CC	Auto 4 CIL	Auto Eléctrico
Rendimiento de gasolina (Km/Lt)	24	14	-----
Recorrido diario (Km)	65	65	65
Días de uso a la semana	7	7	7
Distancia recorrida por semana	455	455	455
Litros de gasolina consumidos por semana	18.96	32.50	-----
Precio de gasolina por litro (premium)	\$23.00	\$23.00	-----
Gasto semanal de gasolina (\$)	\$436.04	\$747.50	-----
Precio kWh CFE (excedente)	-----	-----	\$3.115
Tiempo para cargar banco de batería (Hrs.)	-----	-----	10
Cantidad de kWh demandadas en carga	-----	-----	1.1
Gasto por carga completa de banco de batería	-----	-----	\$34.27
Gasto semanal CFE (\$)	-----	-----	\$239.86
Semanas al año	52	52	52
Gasto anual en gasolina o CFE	\$22,674.17	\$38,870.00	\$12,472.46

De la Tabla 2 se puede observar claramente el ahorro que se puede obtener mediante el uso de un vehículo eléctrico, incluso por encima de una motocicleta de 250 CC. Para la elaboración de la Tabla se emplearon los parámetros más costosos tanto de la gasolina, como de la energía eléctrica.

En la Tabla 3 se muestra la información correspondiente a la compra de un vehículo eléctrico nuevo y al proceso de conversión de un vehículo que tenía motor de gasolina.

Tabla 3. Comparación del valor de vehículos eléctricos nuevos contra proceso de conversión (elaboración propia)

Vehículo modelo	Velocidad máxima	Autonomía	Valor en Pesos
Renault Twizt	80 Km/h	100 Km	\$342,200.00
JAC E 10X	120 Km/h	350 Km	\$425,000.00
Zacua MX3	85 Km/h	160 Km	\$599,900.00
Chevrolet Bolt	180 Km/h	416 Km	\$699,900.00
Nissan Leaf	150 Km/h	241 Km	\$922,900.00
Conversión de vehículo	70 Km/h	65 Km	\$200,000.00

De los modelos de vehículos eléctricos nuevos, el más accesible es el de la marca JAC, con un costo de por lo menos el doble, de lo que cuesta realizar un proceso de conversión.

En la Tabla 4, se muestra la información correspondiente al mantenimiento que se tiene que aplicar tanto a un vehículo con motor de gasolina, como a un vehículo eléctrico.

Tabla 4. Costo de mantenimiento para vehículos con motor de combustión interna (elaboración propia)

Marca de vehículo (tipo sedan básicos)	Paquete básico de afinación
Ford	\$2,525.00
Chevrolet	\$1,589.00
Nissan	\$1,850.00
Vehículo eléctrico	-----

El mantenimiento a los automotores de combustión interna debe realizarse una vez que se han cumplido los kilómetros recorridos, en principio para que los vehículos no pierdan la garantía, y en segundo lugar para que siempre se mantenga el motor de gasolina en condiciones óptimas y que obtenga la calcomanía 0 (cero) para que pueda circular todos los días, considerando que, en caso de contingencia ambiental, el vehículo tendrá que dejar de circular un día a la semana, lo cual no ocurre en los vehículos eléctricos, que circulan diariamente sin importar el estado de la contingencia ambiental.

En los vehículos eléctricos se considera que el gasto de mantenimiento es prácticamente inexistente, ya que no se tendrán que reemplazar líquidos, lubricantes ni refacciones que se desgasten, ni que se degraden por las altas temperaturas que están presentes en un motor a gasolina. En cuanto al mantenimiento de suspensión, sistema de frenos y carrocería, es el mismo que se tiene que aplicar a todos los vehículos por igual, sean eléctricos o no.

Efectos ambientales

Los vehículos eléctricos a diferencia de los que emplean combustibles fósiles para operar solo utilizan energía eléctrica cuando se pisa el acelerador para avanzar, dicho de otra manera, el automóvil que tiene instalado un motor eléctrico, aun cuando se encuentra activado no gasta energía cuando se encuentra detenido por ejemplo en la luz roja de un semáforo, además que la cantidad de gases contaminantes emitidos al medio ambiente es CERO, por esta razón los vehículos eléctricos también son denominados como “EV cero emisiones”. Un vehículo con motor a gasolina emite gases contaminantes a partir de que es encendido, por ello los autos con motor de combustión interna, tienen que estar sometidos al programa de verificación conocido como “hoy no circula”, el cual se encuentra regulado por la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) que está conformado por las secretarías del medio ambiente de las entidades de CDMX, Estado de México, Hidalgo, Morelos Puebla y Tlaxcala, así como por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. La CAME se encarga de indicar los niveles máximos permitidos de contaminantes que los vehículos con motor de combustión interna pueden agregar al medio ambiente.

No es relevante si el vehículo eléctrico fue armado en una ensambladora o fue sometido a un proceso de conversión de gasolina a eléctrico, lo importante es que no contamina durante su desplazamiento. Para contar con una mejor comprensión se procede a mostrar la comparativa que existe entre un vehículo eléctrico convertido (los autos eléctricos de agencia tienen mejor rendimiento) con una serie de automóviles con motor de combustión interna, con respecto a la emisión de gases contaminantes.

Para realizar la comparación de la Tabla 5, se tomaron los datos de vehículos de combustión interna de la categoría catalogada como compactos, los cuales son modelo 2012 que a la fecha cuentan con 10 años de antigüedad. Otro punto para considerar en la comparativa es que realicen un desplazamiento diario de 65 Km, de dicha comparativa se muestran los niveles importantes de gases que los vehículos de combustión interna expidan al medio ambiente cada año de operación, teniéndose en primer instancia las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), que contribuyen a la contaminación del aire a nivel local y aportan problemas en la salud de los seres humanos, además de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) que, en opinión de los científicos, tienen un impacto negativo en el clima del planeta ya que son precursores del calentamiento global, al aumentar sus concentraciones en la atmósfera.

Tabla 5. Comparativa de contaminantes producidos por distintos vehículos (elaboración propia)

Marca	Submarca	Modelo	Rendimiento combinado (Km/L)	Emisión CO2 (g/Km) ¹	Emisión NOx (g/1000Km) ²	Recorrido anual (Km)	Emisión anual CO2 (Kg)	Emisión anual NOx (g)
Cualquier EV	Cualquier submarca	2012	0	0	0	23725	0.00	0
Chevrolet	Cruze 4 Pts 1.8L 4 Cil	2012	12.48	216	69	23725	5124.60	1637.025
Dodge	Avenger 4 Pts 2.4L 4 Cil	2012	9.39	272	10	23725	6453.20	237.25
Ford	Focus sedan 4 Pts 2.0L 4 Cil	2012	14.2	186	16	23725	4412.85	379.6
Honda	Civic sedan 4 Pts 2.4L 4 Cil	2012	10.6	243	20	23725	5765.18	474.5
Nissan	Sentra 4 Pts 2.0L 4 Cil	2012	13.3	205	20	23725	4863.63	474.5

Notas:

- 1.- Dato obtenido de la página <https://ecovehiculos.inecc.gob.mx/>
- 2.- Dato obtenido de la página <https://ecovehiculos.inecc.gob.mx/>

Se puede inferir que al emplear un vehículo eléctrico se deja de emitir gases contaminantes al medio ambiente, sobre todo considerando la cantidad de automotores de combustión interna con años de antigüedad considerable, a este respecto empleando el estudio realizado por Evaristo García Urriolagoita presidente del Integrate Data Facts en el cual indica que el parque vehicular en operación reporta una edad promedio o antigüedad de 15.5 años, aunque los automotores de 1 a 10 años de uso sobrepasan los 12 millones, mientras que las unidades de 10 a 20 años consta de 11 millones. Con esta información se puede realizar un cálculo general de los contaminantes emitidos por todos los autos a gasolina y que podrían desaparecer dichos contaminantes, si todos esos vehículos antiguos fueran convertidos en eléctricos.

En el caso de que la demanda eléctrica adicional en México se incremente debido al empleo masivo de vehículos eléctricos, se podría tener la duda acerca de si el sistema eléctrico nacional tendría capacidad de respuesta, y junto a esta duda se podría agregar si esta actividad para Comisión Federal de Electricidad no generará mayor contaminación. Pues bien, de acuerdo con la información preliminar que se tiene registrada para agosto del año 2022 se tienen 35,717,019 (poco más de 35 millones) automóviles registrados en el territorio nacional; de los cuales los vehículos mexicanos realizan en promedio recorridos de aproximadamente 10,000 Km por año, si todos estos autos fueran eléctricos y experimentaran un desempeño de 15 kWh por cada 100 Km que hayan recorrido tal cual desarrollan los vehículos eléctricos diseñados para las comunidades urbanas. Con esta proyección y tomando en cuenta las fuentes que se emplean en México para generar electricidad, se puede asegurar que en el país no se emitirá más contaminación en la generación de energía eléctrica que la que arrojan actualmente los autos con motores de combustión interna, e inclusive la contaminación ambiental de la Ciudad de México y su área conurbada experimentaría una mejora considerable.

En el contexto económico actual, donde la adquisición de vehículos eléctricos resulta inaccesible para la mayoría de los propietarios de automóviles convencionales, México mantiene su compromiso con los objetivos climáticos establecidos en el Acuerdo de París (2015). Este tratado global busca contener el aumento de la temperatura media del planeta muy por debajo de los 2°C, con aspiración a limitarlo a 1.5°C respecto a niveles preindustriales. Para materializar esta ambiciosa meta, la comunidad internacional ha establecido como prioridad alcanzar el pico máximo de emisiones en el menor plazo posible, con miras a lograr la neutralidad climática hacia 2050.

Metas específicas de implementación:

1. Corto plazo (2024):
Alcanzar 35% de generación eléctrica mediante fuentes renovables

2. Mediano plazo (2030-2033):
Reducir 22% de GEI y 51% de carbono negro (base 2020)
Lograr 39.9% de participación de energías limpias en la matriz eléctrica
3. Largo plazo (2050):
Alcanzar 50% de generación limpia
Reducir 31% de emisiones en el sector energético

Por último, se puede afirmar que la emisión de los gases contaminantes no solo proviene de los vehículos de combustión interna, sino que estos aportan el 18% de las emisiones de CO₂, principal gas causante del efecto invernadero. A pesar de los incentivos antes enumerados, la sustitución de los automóviles de combustión interna con una antigüedad de por lo menos 10 años, por vehículos eléctricos nuevos es complicado para la mayor parte de la población, debido al alto valor que estos tienen, por ello se plantea realizar la conversión de autos que utilizan gasolina de por lo menos 10 años de antigüedad, a vehículos eléctricos. Siendo esta medida alcanzable económicamente para que el transporte en vehículos particulares sea sustentable y amigable con el medio ambiente.

Resultados y Discusión

Los resultados de este estudio demuestran que la conversión de vehículos de combustión interna (VCI) a eléctricos (EV) tiene impactos significativos en tres dimensiones clave: ambiental, económica y social. A continuación, se presentan los hallazgos más relevantes respaldados por datos concretos y su interpretación en el contexto de la Megalópolis Mexicana.

Impacto ambiental

La adopción de EVs mediante conversión elimina por completo las emisiones directas de gases contaminantes. Según los análisis realizados, un VCI compacto (modelo 2012) emite en promedio 5,124 kg de CO₂ anuales y 1,637 g de NO_x, mientras que un EV convertido reduce estas emisiones a 0 kg (Tabla 5). Esta reducción es crítica en ciudades como la CDMX, donde el transporte contribuye con el 60% de las PM₁₀ (INECC, 2022). Además, durante la temporada de ozono (abril-junio), cuando las condiciones climáticas impiden la dispersión de contaminantes, la flota vehicular convertida podría mitigar hasta 18% de las emisiones totales del sector transporte, disminuyendo la frecuencia de contingencias ambientales (ITDP, 2021).

Sin embargo, es crucial destacar que el beneficio ambiental completo depende del origen de la energía eléctrica. Actualmente, el 46% de la electricidad en México se genera con gas natural (SENER, 2021), lo que implica emisiones indirectas. No obstante, incluso considerando este factor, la huella de carbono de un EV convertido es un 50% menor que la de un VCI, gracias a la mayor eficiencia energética de los motores eléctricos (Tabla 5).

Beneficios económicos

Los beneficios económicos de la conversión a vehículos eléctricos (EVs) se sustentan en tres pilares: ahorro en combustible, reducción de costos de mantenimiento, e incentivos fiscales. A continuación, se detallan las cifras y su justificación técnica:

Ahorro en Combustible

Justificación:

El ahorro del 87.5% (1,200 vs. 1,200 vs. 150 MXN) surge de:

1. Mayor eficiencia de los motores eléctricos (90% vs. 30% en motores de combustión).
2. Precios estables de la electricidad (vs. volatilidad de la gasolina).

Tabla 6. Comparación económica respecto al ahorro en combustible entre un vehículo de gasolina y un EV convertido (elaboración propia)

Concepto	Vehículo de Gasolina (Compacto 2012)	EV Convertido
Consumo promedio	12.5 km/l (INECC, 2022)	15 kWh/100 km (SENER, 2021)
Recorrido mensual	1,950 km (65 km/día × 30 días)	1,950 km (65 km/día × 30 días)
Litros/kWh consumidos	156 litros/mes (1,950 ÷ 12.5)	292.5 kWh/mes (1,950 × 0.15)
Costo por unidad	\$7.69 MXN/litro (gasolina magna, 2023)	\$0.513 MXN/kWh (tarifa DAC nocturna)
Costo total mensual	\$1,200 MXN (156 × 7.69)	\$150 MXN (292.5 × 0.513)

Reducción de Mantenimiento

Tabla 7. Costo de reducción de mantenimiento para vehículos con motor de combustión interna (elaboración propia)

Concepto	Vehículo de Gasolina	EV Convertido	Razones Técnicas
Costo Anual Promedio	\$3,000 MXN/año	\$500 MXN/año	Los EVs tienen menos componentes sujetos a desgaste.
Distribución de Costos	- Cambio de aceite y filtros: \$800 MXN - Bujías, correas y escape: \$1,200 MXN - Reparaciones menores: \$1,000 MXN	- Frenos y suspensión: \$500 MXN	- Sin sistema de lubricación (no requieren aceite). - Sin combustión (elimina bujías, inyectores, escape). - Transmisión más simple (menos piezas móviles).

Ahorro Anual en Mantenimiento

$$\text{Ahorro estimado: } \$3,000 \text{ MXN (gasolina)} - \$500 \text{ MXN (EV)} = \$2,500 \text{ MXN/año}$$

Incentivos Fiscales

Ahorros adicionales (por vehículo):

1. Exención de verificación vehicular: \$1200 MXN/año (costo promedio en CDMX).
2. Exención de tenencia: 2,000 a 5,000 MXN/año (dependiendo del valor del vehículo).
3. Deducción fiscal (ISR): Hasta \$17,500 MXN anuales (10% del costo de conversión, Art. 35 LISR).

Ejemplo de retorno de inversión:

- Costo de conversión: \$150,000 MXN.

Ahorros anuales:

- Combustible: 12,600MXN(12,600MXN(1,050 MXN/mes × 12).
- Mantenimiento: \$2,500 MXN.
- Incentivos: \$7,600 MXN (promedio).
- Total anual: \$22,700 MXN (retorno en aproximadamente 6.6 años).

Discusión Económica

1. La viabilidad financiera de la conversión depende de:
2. Uso intensivo del vehículo: A mayor kilometraje, más rápido el retorno de inversión (por ejemplo en flotas de reparto).
3. Acceso a incentivos: Usuarios en CDMX ahorran más por exenciones locales vs. otros estados.

4. Precios de energía: Si la tarifa DAC aumenta, el ahorro relativo se reduce.

Barreras y limitaciones

A pesar de los beneficios, persisten desafíos:

- Infraestructura: La Megalópolis cuenta con menos de 1,000 estaciones de carga públicas, insuficientes para una transición masiva (SENER, 2022).
- Capacidad técnica: Solo el 15% de los talleres mecánicos en México están certificados para realizar conversiones (AMDA, 2023).
- Percepción pública: El 62% de los usuarios desconfía de la autonomía de los EVs convertidos (Encuesta INEGI, 2022).

Discusión integrada

Los resultados confirman que la conversión es una estrategia viable para descarbonizar el transporte en el corto plazo, especialmente para vehículos antiguos. Sin embargo, su escalabilidad requiere:

1. Políticas públicas: Subsidios directos para conversiones y ampliación de la infraestructura de carga.
2. Educación: Campañas que destaquen los ahorros y beneficios ambientales.
3. Colaboración sector privado-gobierno: Certificación de talleres y estandarización de procesos.

Conclusiones

Los resultados de este estudio demuestran que la conversión de vehículos de combustión interna a eléctricos representa una estrategia técnicamente viable, económicamente atractiva y ambientalmente necesaria para la Megalópolis Mexicana. Los análisis cuantitativos revelan que:

1. En el ámbito ambiental, la conversión elimina el 100% de emisiones directas de CO₂ (5,124 kg/vehículo/año) y NO_x, contribuyendo significativamente a mitigar las contingencias atmosféricas recurrentes en temporada de ozono.
2. Económicamente, los ahorros son sustanciales:
 - Combustible: Reducción del 87.5% (1,200vs.1,200vs.150 MXN/mes), con retorno de inversión en 6.6 años para usuarios con recorridos de 65 km/día.
 - Mantenimiento: Disminución del 83% en costos anuales, gracias a la simplicidad mecánica de los EVs.
 - Incentivos fiscales: Ahorros adicionales de hasta \$7,600 MXN/año por exenciones.
3. Socialmente, esta solución democratiza la movilidad limpia al ser un 50% más accesible que comprar un EV nuevo, beneficiando especialmente a dueños de vehículos antiguos (mayores a 10 años) que representan el 69% del parque vehicular nacional.

Recomendaciones clave:

- Implementar políticas públicas que subsidien conversiones, especialmente para flotas gubernamentales.
- Expandir la infraestructura de carga con energías renovables para maximizar beneficios climáticos.
- Establecer programas de certificación para talleres especializados.

En síntesis, la electrificación mediante conversión es una herramienta pragmática para avanzar hacia la sostenibilidad urbana, alineándose con los compromisos del Acuerdo de París y las metas nacionales de reducción de GEI.

Bibliografía

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (s.f.). Obtenido de <https://www.gob.mx/conuee>

Greenpeace. (2019). Marcas de coches que más contaminan. Obtenido de <https://es.greenpeace.org/es/noticias/estas-son-las-marcas-de-coches-que-mas-contaminan/>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (s.f.). Portal de Indicadores de Eficiencia Energética y Emisiones Vehiculares. Obtenido de <https://ecovehiculos.inecc.gob.mx/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s.f.). Parque Vehicular. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>

- Noticias Parlamento Europeo. (2022). El PE quiere emisiones cero para turismos y furgonetas en 2035. Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20220603IPR32129/el-pe-quiere-emisiones-cero-para-turismos-y-furgonetas-en-2035>
- Noticias Parlamento Europeo. (2022). El régimen de comercio de derechos de emisión de la UE y su reforma. Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/priorities/cambio-climatico/20170213STO62208/el-regimen-de-comercio-de-derechos-de-emision-de-la-ue-y-su-reforma>
- Noticias Parlamento Europeo. (2022). Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía). Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
- Noticias Parlamento Europeo. (2022). Pacto Verde Europeo: clave para una UE climáticamente neutra y sostenible. Obtenido de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/priorities/cambio-climatico/20200618STO81513/pacto-verde-europeo-clave-para-una-ue-climaticamente-neutral-y-sostenible>
- ONU. (2022). Agenda para el desarrollo sostenible. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- ONU Habitat. (s.f.). Contaminación, automóviles y calidad del aire. Obtenido de <https://onuhabitat.org.mx/index.php/contaminacion-automoviles-y-calidad-del-aire#:~:text=Los%20autom%C3%B3viles%20particulares%20generan%20el,las%20medidas%20de%20prevenci%C3%B3n%20adecuadas>
- Onuhabitat. (2015). Reporte Nacional de movilidad urbana 2014–2015. Obtenido de <https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/Reporte-Nacional-de-Movilidad-Urbana-en-Mexico-2014-2015.pdf>
- Saldaña, S. (2022). *Xataka México*. Acabó la temporada de ozono: hubo cinco contingencias ambientales en CDMX y área metropolitana, dos más que en 2021. Obtenido de <https://www.xataka.com.mx/ecologia-y-naturaleza/acabo-temporada-ozono-hubo-cinco-contingencias-ambientales-cdmx-area-metropolitana-dos-que-2021#:~:text=Cripto-Acab%C3%B3%20la%20temporada%20de%20ozono%3A%20hubo%20cinco%20contingencias%20ambientales%20en,d>
- Secretaría de Economía. (s.f.). Responsabilidad Social Empresarial. Obtenido de <https://www.gob.mx/se/articulos/responsabilidad-social-empresarial-32705>
- Secretaría de Energía. (s.f.). Reporte Anual del Potencial de Mitigación de GEI en el Sector Eléctrico. Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/articulos/reporte-anual-del-potencial-de-mitigacion-de-gei-en-el-sector-electrico>
- United Nations Climate Change. (s.f.). El acuerdo de París. Obtenido de <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- World Health Organization. (2022, abril). Air quality database. Obtenido de <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-air-quality-database>

Análisis numérico CFD del proceso de combustión de una estufa eficiente de biomasa: eficiencia global, rendimiento térmico y emisiones de CO₂e

Paulo C. Medina Mendoza ^{1,*}, Alberto Beltrán Morales ², Wenceslao C. Bonilla Blancas ¹ y Martín Salazar Pereyra ¹

¹ División de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial (DIMMI), Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables (MEEER), Tecnológico Nacional de México (TecNM)/TES de Ecatepec (TESE), Av. Tecnológico S/N, Col. Valle de Anáhuac, Ecatepec de Morelos, C.P. 55210, Estado de México, México

² Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

* Autor de correspondencia: paulomedina@tese.edu.mx

Energías Renovables (Biomasa)

Recibido: 27 de mayo de 2025

Aceptado: 21 de julio de 2025

Publicado: 6 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.459>

Resumen: En este trabajo se evalúa el rendimiento de una estufa eficiente de biomasa (IBS) tipo plancha modelo Tuya utilizando 6 reacciones químicas en el proceso de combustión para comparar los resultados numéricos con mediciones experimentales. Se implementa un análisis numérico de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el software ANSYS Fluent para simular los principales fenómenos de transporte de la estufa de biomasa. La CFD es una herramienta que se ha utilizado para modelar y simular diferentes sistemas térmicos de combustión de biomasa tales como las IBS con la finalidad de optimizar la eficiencia térmica y reducir las emisiones contaminantes. La estufa de biomasa se evaluó mediante una prueba con tres repeticiones (Pruebas 1, 2 y 3) de 40 min cada una, 10 minutos de estabilización y 30 minutos de funcionamiento de la estufa. En las simulaciones numéricas fueron configurados dos escenarios: TY_6R_L2 y TY_6R_L3 utilizando un coeficiente de exceso de aire (λ) igual a 2 y 3, respectivamente, en las 3 pruebas de rendimiento. En la comparación de mediciones experimentales y resultados numéricos, se reporta que las diferencias entre eficiencia de combustión experimental (ECE) y numérica (NCE) fueron del 1-5%, esto se considera como uno de los hallazgos clave de este estudio debido a la relevancia de la eficiencia de combustión en el rendimiento de la estufa. El caso numérico TY_6R_L3 reporta una mejor distribución de la temperatura en la superficie del comal lo cual se puede explicar debido a que el exceso de aire primario y secundario ($\lambda = 3$) optimizan el flujo de calor a lo largo del cuerpo de la estufa. En el caso de las emisiones de CO₂e se obtuvieron diferencias del 35 y 19% para los casos numéricos TY_6R_L2 y TY_6R_L3, respectivamente, comparados con el valor experimental de 0.68 ± 0.13 kgCO₂e/kg. La relevancia de esta comparación radica en que el modelo numérico de 6 reacciones predice de manera aceptable la contribución al cambio climático de una estufa eficiente de biomasa. En general, los resultados de la comparación de los casos numéricos muestran que λ tiene un efecto significativo en la mejora tanto de la transferencia de calor como del proceso de combustión de la IBS Tuya.

Palabras clave: estufa Tuya; CFD; eficiencia; emisiones; combustión

Introducción

En 2020, el suministro energético global de biomasa en el sector residencial fue de 57.5 EJ, del cual el 86% provino de fuentes de biomasa sólida incluyendo leña, astillas, pellets de madera y otras fuentes tradicionales de biomasa (GLOBAL BIOENERGY STATISTICS, 2023). En México, aproximadamente 31 millones de personas utilizan leña (116.6 PJ) (Pérez *et al.*, 2022) para satisfacer necesidades energéticas básicas como cocción de alimentos, calefacción y calentar agua (Serrano-Medrano *et al.*, 2018). Las tecnologías utilizadas en el sector rural-residencial son mayoritariamente dispositivos tradicionales de 3 piedras (fogones) los cuales tienen impactos importantes en salud y en la emisión significativa de gases de efecto invernadero (GHG, por sus siglas en inglés). Las estufas eficientes de biomasa (IBS, por sus siglas en inglés) son sistemas térmicos que optimizan el proceso de combustión y la transferencia de calor en comparación con los fogones tradicionales (Medina, 2017).

Diversas investigaciones han comparado las IBS con los fogones de tres piedras o en forma de U y se han encontrado reducciones sustanciales de emisiones de GHG (Johnson *et al.*, 2008; Ruiz-García *et al.*, 2021), de emisiones interiores (Armendáriz-Arnez *et al.*, 2010; Patange *et al.*, 2015; Grieshop *et al.*, 2011) y de consumo de combustible (Berrueta *et al.*, 2008). Una de las posibles explicaciones de tales diferencias en el rendimiento de IBS en comparación con los fogones tradicionales es la presencia de una cámara de combustión (propia de los sistemas térmicos) donde se presentan las siguientes condiciones las cuales optimizan la eficiencia energética y de combustión (Medina, 2017): 1) temperatura suficientemente alta para alcanzar las 4 etapas de la combustión de biomasa, 2) relación aire/combustible

adecuada, 3) tiempo de residencia suficiente para la formación y reacción de los gases de combustión y 4) flujo de aire adecuado para la quemar los gases combustibles. En la siguiente sección se explican cada una de estas variables.

La combustión es una interacción compleja de procesos físicos y químicos en la cual se presenta una reacción de un combustible con el oxígeno del aire para liberar calor y que suministra aproximadamente el 80% de la energía mundial (Sadaka & Johnson, 2011). El proceso de combustión de biomasa es fundamental para evaluar el desempeño y durante la etapa de diseño de una IBS (Koppejan & Van Loo, 2012). Existen variables fundamentales en el fenómeno de combustión las cuales pueden optimizar el proceso de quema de biomasa en estufas eficientes. En este sentido, la combustión de biomasa consta de 4 etapas fundamentales: secado, pirólisis, gasificación y oxidación completa (combustión) (Koppejan & Van Loo, 2012). La temperatura adiabática de flama puede alcanzar valores teóricos e ideales de 2273 K para la leña la cual depende de variables tales como: poder calorífico, contenido de humedad, relación aire/combustible y el diseño de la tecnología (Sadaka & Johnson, 2011). El tiempo de residencia necesario para una combustión completa está influenciado directamente por la temperatura de combustión (Koppejan & Van Loo, 2012). El coeficiente de exceso de aire (λ) es uno de los factores más importantes en la eficiencia global de los sistemas de combustión de biomasa (Kumar & Paul, 2019). El λ es necesario para incrementar la temperatura de la llama y optimizar la combustión (De Jong & Van Ommen, 2014). Finalmente, el aire primario es necesario para la gasificación del combustible sólido, mientras que el aire secundario es necesario para asegurar una combustión eficiente con bajos niveles de emisiones contaminantes (Zdravec *et al.*, 2020).

Por otra parte, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una herramienta que se ha utilizado para modelar y simular diferentes sistemas térmicos de combustión de biomasa (Lee *et al.*, 2010; Su *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2023). Estudios recientes han implementado un análisis numérico CFD para compararlo con mediciones experimentales de diferentes modelos de IBS. Recientemente, el análisis numérico del proceso de combustión en IBS se ha realizado utilizando modelos de 1 reacción (Núñez *et al.*, 2020; Medina *et al.*, 2021; Medina *et al.*, 2022; Galindo *et al.*, 2024) y 2 reacciones químicas (Medina *et al.*, 2024). En este trabajo se evalúa el rendimiento de una estufa de biomasa tipo plancha utilizando un modelo de combustión de 6 reacciones para comparar los resultados numéricos con mediciones experimentales de 3 pruebas de rendimiento para la IBS modelo Tuya. Además de las especies químicas, se analizan la transferencia de calor y el flujo de fluidos para simular los fenómenos de transporte de la estufa. La principal innovación de este estudio radica en la implementación numérica de un modelo de reacciones el cual simula tanto la fase gaseosa como de la fase sólida del proceso de combustión además del uso de variables fundamentales tales como λ , aire primario y secundario, la temperatura de entrada como función de λ , entre otras. En relación con estudios CFD similares, en los cuales el fenómeno de combustión se explica mediante modelos relativamente simples, este trabajo representa una mejora importante en el análisis numérico de una estufa de biomasa.

Materiales y Métodos

Mediciones experimentales

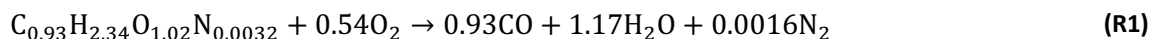
La estufa de biomasa evaluada es el modelo Tuya (antes llamada Onil) la cual está construida de material cerámico y con un comal (plancha) metálico de 34 x 70.5 cm con discos removibles si los usuarios prefieren cocinar a fuego directo. La estufa Tuya se evaluó mediante una prueba con tres repeticiones (Pruebas 1, 2 y 3) de 40 min cada una, 10 minutos de estabilización y 30 minutos de funcionamiento de la estufa. El objetivo de las pruebas fue alcanzar un comportamiento estable para analizar diferentes parámetros (energéticos y de emisiones) en los 30 minutos de operación. Adicionalmente, se calcularon la eficiencia de combustión experimental (ECE), así como la eficiencia térmica experimental (ETE) mediante las Ecuaciones 1 y 2. La ECE considera únicamente los flujos molares de dióxido (CO_2) y monóxido de carbono (CO) para el cálculo de la eficiencia de combustión (Jetter *et al.*, 2012; Johnson *et al.*, 2010). Por otra parte, en la ETE se considera un cociente entre el calor útil (calor del comal metálico) y la potencia de entrada (Medina *et al.*, 2021).

$$ECE (\%) = \frac{\dot{n}_{\text{CO}_2}}{\dot{n}_{\text{CO}_2} + \dot{n}_{\text{CO}}} \quad (1)$$

$$ETE (W) = \frac{Q_{comal}}{\text{potencia de entrada}} \quad (2)$$

Modelo de combustión

El modelo de reacciones químicas utilizado para simular el proceso de combustión de la estufa de biomasa Tuya consta de 6 reacciones (Medina *et al.*, 2025) de las cuales las reacciones 1-4 describen la fase gaseosa mientras que las reacciones 5-6 muestran la fase sólida (gasificación del carbón residual).



Parámetros de entrada

La Tabla 1 muestra los parámetros de entrada utilizados en las simulaciones numérica de la estufa de biomasa Tuya en dos escenarios: TY_6R_L2 y TY_6R_L3 utilizando un coeficiente de exceso de aire $\lambda = 2$ y $\lambda = 3$, respectivamente, en las 3 pruebas de rendimiento. El flujo másico de volátiles de biomasa (ID = 4) fue calculado considerando la biomasa de entrada, el tiempo de operación de cada prueba y el contenido de volátiles (85.7%) en la leña (Filipe dos Santos Viana *et al.*, 2018). La temperatura de combustión (ID = 6) en la entrada de la cámara de combustión se obtuvo como función de los valores utilizados del coeficiente de exceso de aire ($\lambda = 2$ y $\lambda = 3$) según lo reportado por Koppejan y Van Loo, (Koppejan & Van Loo, 2012). El flujo de aire primario y secundario fue estimado utilizando cálculos estequiométricos mediante las reacciones R1 y R2 de acuerdo con lo reportado por Medina *et al.* (Medina *et al.*, 2024). El flujo de entrada de carbón residual fue calculado utilizando el contenido de volátiles (Cruz Montelongo *et al.*, 2020), así como el porcentaje de conversión leña a carbón (5 a 1) (FAO, s.f.). El diámetro y velocidad de las partículas biomasa, para configurar la fase discreta en el software comercial ANSYS Fluent, se citan en los ID 12 y 13, de la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de entrada utilizados para la estufa Tuya.

ID	Parámetro	TY_6R_L2			TY_6R_L3			Referencia
		Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3	
1	Biomasa de entrada (kg)	0.634	0.617	0.534	0.634	0.617	0.534	(Medina <i>et al.</i> , 2021)
2	Tiempo (min)	30	30	30	30	30	30	(Medina <i>et al.</i> , 2021)
3	Flujo de entrada (biomasa) (kg/s)	3.52E-04	3.43E-04	2.97E-04	3.52E-04	3.43E-04	2.97E-04	-
4	Flujo de entrada (biomasa-volátiles) (kg/s)	3.02E-04	2.94E-04	2.54E-04	3.02E-04	2.94E-04	2.54E-04	(Filipe dos Santos Viana <i>et al.</i> , 2018)
5	Relación de exceso de aire (λ)	2	2	2	3	3	3	(Koppejan & Van Loo, 2012)
6	Temperatura de entrada (K)	1573	1573	1573	1473	1473	1473	(Koppejan & Van Loo, 2012)
7	Potencia de entrada (kW)	4.47	5.81	6.47	4.47	5.81	6.47	-
8	Flujo aire primario (kg/s)	2.95E-04	3.83E-04	4.27E-04	6.13E-04	5.96E-04	5.16E-04	(Medina <i>et al.</i> , 2024)
9	Flujo aire secundario (kg/s)	2.17E-04	2.82E-04	3.15E-04	4.52E-04	4.40E-04	3.81E-04	(Medina <i>et al.</i> , 2024)
10	Temperatura de aire primario y secundario (K)	500	500	500	700	700	700	(Koppejan & Van Loo, 2012)
11	Flujo de carbón residual (kg/s)	7.04E-05	6.86E-05	5.93E-05	7.04E-05	6.86E-05	5.93E-05	(Cruz Montelongo <i>et al.</i> , 2020; FAO, s.f.)
12	Temperatura de carbón residual (K)	1800	1800	1800	1800	1800	1800	(Zeng <i>et al.</i> , 2015)
13	Diámetro de partículas de biomasa (m)	4.88E-04	4.88E-04	4.88E-04	4.88E-04	4.88E-04	4.88E-04	(Liu <i>et al.</i> , 2016)
14	Velocidad de partículas de biomasa (m)	4	4	4	4	4	4	(Jobaidur & Ting, 2013)

Configuración numérica

El software ANSYS Fluent fue utilizado para simular las 3 pruebas de rendimiento de la estufa Tuya. **Malla computacional.** El volumen interno de la estufa (en donde se llevan a cabo los diferentes fenómenos de transporte) fue discretizado utilizando una malla hexaédrica mediante el método 'MultiZone' con los siguientes parámetros de calidad: ortogonalidad = 0.94 y oblicuidad = 0.15. **Condiciones de frontera.** El dominio computacional fue seccionado como fluido (volumen interno) y sólido (comal metálico) con las siguientes condiciones de frontera: entrada de volátiles, entradas de aire primario y secundario, comal, chimenea, pared de la estufa y salida. **Flujo de fluidos.** El modelo 'k-epsilon' fue empleado para simular el flujo bajo condiciones de turbulencia (Marangwanda *et al.*, 2020). **Transferencia de calor.** Para simular el mecanismo de transferencia de calor por radiación se implementó el modelo de ordenadas discretas (Tu *et al.*, 2019; Somwangthanaroj & Fukuda, 2020). **Especies.** Además del modelo de 6 reacciones químicas, se utilizó el modelo 'Fuel and thermal NOx' (Kang *et al.*, 2017) y el modelo 'Soot' (Chen *et al.*, 2021) para simular las emisiones de material particulado. **Fase discreta.** Fue utilizada para simular la interacción química entre las partículas de biomasa en estado sólido y la fase gaseosa (Marangwanda *et al.*, 2020). **Materiales.** El material de construcción de la estufa Tuya es un cerámico que fue considerado como óxido de calcio en el simulador. Para las zonas metálicas de la estufa (chimenea y comal) se utilizó un coeficiente convectivo $h = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Medina *et al.*, 2022; Galindo *et al.*, 2024).

Parámetros numéricos

Para comparar las eficiencias experimentales, se calculó la eficiencia de combustión numérica (NCE) la cual es un cociente del flujo másico de productos de la combustión incompleta (PIC, por sus siglas en inglés): CO, metano (CH_4), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM) entre los volátiles de entrada de la biomasa como se describe en la Ecuación 3. Por otra parte, la eficiencia térmica numérica (NTE) se calcula utilizando el calor del comal (obtenido en el simulador Fluent) entre la potencia de entrada (Ecuación 4).

$$NCE (\%) = 1 - \left(\frac{\dot{m}_{PICs}}{\dot{m}_{\text{volátiles de entrada}}} \right) \quad (3)$$

$$NTE (W) = \frac{Q_{\text{comal}}}{\text{potencia de entrada}} \quad (4)$$

Emisiones de CO_2

Para el cálculo del impacto al calentamiento global de la estufa Tuya fueron utilizados los potenciales de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) sobre un horizonte de 100 años. Para representar la fracción de no renovabilidad de la biomasa se utiliza un valor para el CO_2 igual a 0.25 (Bailis *et al.*, 2015). Los valores de GWP para los PIC fueron: CO = 1.9 (IPCC, 2007), $\text{CH}_4 = 28$ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) y $\text{NO}_x = 10$ (Lammel & Graßl, 1995). El PM fue considerado como carbono negro para el cual el GWP es igual a 680 (MacCarty *et al.*, 2008).

Resultados y Discusión

Comparación de casos numéricos

La Tabla 2 muestra la comparación de los 2 casos numéricos: TY_6R_L2 vs. TY_63_L3 para los flujos de emisiones de CO_2 , CO, CH_4 , NO_x y PM, así como para las eficiencias, calor del comal y flujo de productos de la combustión incompleta (PIC's). Para el caso TY_6R_L2, el rango de emisiones de CO_2 , NCE, NTE y Qc para las 3 pruebas fue de: 1.97×10^{-4} a $3.98 \times 10^{-4} \text{ kgCO}_2/\text{s}$, 93.84 a 98.75%, 21.70 a 25.85% y 1788 a 2051 W, respectivamente. Mientras que para el caso TY_6R_L3: 3.32×10^{-4} a $4.60 \times 10^{-4} \text{ kgCO}_2/\text{s}$, 96.09 a 98.36%, 27.51 a 29.67% y 1942 a 2473 W, respectivamente.

El menor rango de diferencias fue reportado en la NCE con 0.3%, mientras que el mayor fue observado en las emisiones de metano en la Prueba 1 con 89%.

Tabla 2. Comparación entre los casos numéricos TY_6R_L2 vs. TY_63_L3

Caso	Prueba	CO ₂ (kg/s)	CO (kg/s)	CH ₄ (kg/s)	NOx (kg/s)	PM (kg/s)	NCE (%)	NTE (%)	Qc (W)	PIC's (kg/s)
TY_6R_L2	1	1.97E-04	5.26E-06	1.40E-06	5.02E-08	4.62E-08	93.84	25.85	1788	1.34E-05
TY_6R_L3		3.32E-04	3.86E-06	1.56E-07	7.03E-08	3.72E-08	96.09	29.67	1942	8.50E-06
Diferencias (%)	-	41	27	89	29	19	2	13	8	37
TY_6R_L2	2	2.40E-04	4.18E-06	4.16E-07	6.75E-08	6.06E-08	97.38	22.73	1955	7.40E-06
TY_6R_L3		3.90E-04	4.01E-06	2.50E-07	1.19E-07	1.13E-07	97.64	28.73	2344	6.68E-06
Diferencias (%)	-	38	4	40	43	46	0.3	21	17	10
TY_6R_L2	3	3.98E-04	3.42E-06	3.88E-07	5.85E-08	6.65E-08	98.75	21.70	2051	3.93E-06
TY_6R_L3		4.60E-04	4.71E-06	1.97E-07	1.32E-07	1.33E-07	98.36	27.51	2473	5.18E-06
Diferencias (%)	-	13	28	49	56	50	0.4	21	17	24

Validación

Parámetros globales

La Tabla 3 muestra la comparación de los TY_6R_L2 y TY_63_L3 en relación con los resultados experimentales de la estufa Tuya. El rango de diferencias para los flujos máxicos de CO₂ fue de 59-69% y 34-48% para los casos TY_6R_L2 y TY_63_L3, respectivamente. Para las eficiencias de combustión, el rango de diferencias fue 1-5% para los dos casos numéricos, mientras que la comparación entre ETE y NTE mostró un rango de 10-14% (TY_6R_L2) y 1-12% (TY_6R_L3). La relación entre flujo másico de CO₂ y ECE-NCE se describe en la Figura 1. Los resultados muestran que existe una clara correlación entre las emisiones de CO₂ y la eficiencia de combustión tanto experimental como numérica. El coeficiente de determinación (R²) fue de 0.98, 0.93 y 0.71 para las mediciones experimentales, TY_6R_L3 y TY_6R_L2, respectivamente. En la Figura 2 se aprecian las eficiencias ETE y NTE, así como el calor del comal experimental y numérico. En general, en el análisis de las Figuras 1 y 2 se puede observar que el caso TY_6R_L3 muestra resultados más cercanos respecto a los valores experimentales tal y como también se reporta en los porcentajes de diferencia de la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación entre los casos numéricos TY_6R_L2 y TY_63_L3 vs. mediciones experimentales para la estufa Tuya

Caso	Prueba	CO ₂ (kg/s)	CO (kg/s)	CH ₄ (kg/s)	NOx (kg/s)	PM (kg/s)	ECE-NCE (%)	ETE-NTE (%)	Qc (W)
Experimental	1	6.32E-04 ± 1.63E-04	3.67E-06 ± 1.42E-06	-	6.20E-07 ± 1.67E-07	-	98.74 ± 0.43	30 ± 7.49	2033
TY_6R_L2		1.97E-04	5.26E-06	1.40E-06	5.02E-08	4.62E-08	93.84	25.85	1788
TY_6R_L3		3.32E-04	3.86E-06	1.56E-07	7.03E-08	3.72E-08	96.09	29.67	1942
Diferencias (%)		-	(69, 48)	-	(92, 99)	-	(5, 3)	(14, 1)	(12, 4)
Experimental	2	5.89E-04 ± 1.38E-04	5.27E-06 ± 2.17E-06	-	4.49E-07 ± 1.64E-07	-	98.27 ± 0.24	26.32 ± 5.61	2673
TY_6R_L2		2.40E-04	4.18E-06	4.16E-07	6.75E-08	6.06E-08	97.38	22.73	1955
TY_6R_L3		3.90E-04	4.01E-06	2.50E-07	1.19E-07	1.13E-07	97.64	28.73	2344
Diferencias (%)		-	(59, 34)	-	(85, 99)	-	(1, <1)	(14, 8)	(27, 12)
Experimental	3	6.44E-04 ± 1.98E-04	3.31E-06 ± 3.80E-07	-	6.47E-07 ± 1.89E-07	-	98.87 ± 0.22	25.37 ± 8.13	2750
TY_6R_L2		3.98E-04	3.42E-06	3.88E-07	5.85E-08	6.65E-08	98.75	21.70	2051
TY_6R_L3		4.60E-04	4.71E-06	1.97E-07	1.32E-07	1.33E-07	98.36	27.51	2473
Diferencias (%)		-	(63, 39)	-	(91, 99)	-	(2, 1)	(10, 12)	(29, 15)

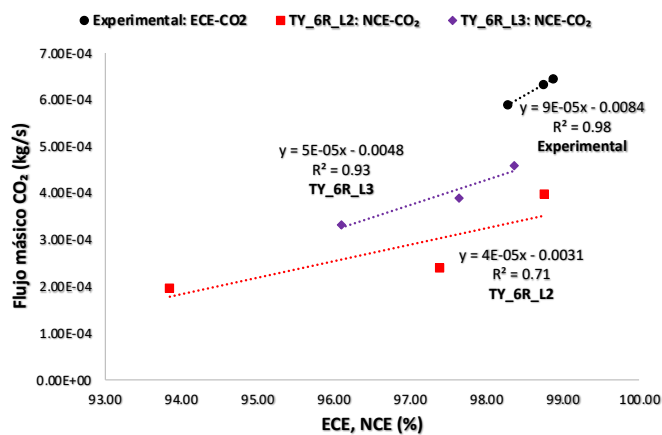


Figura 1. Eficiencias de combustión vs. flujo másico de CO₂ para mediciones experimentales y casos numéricos

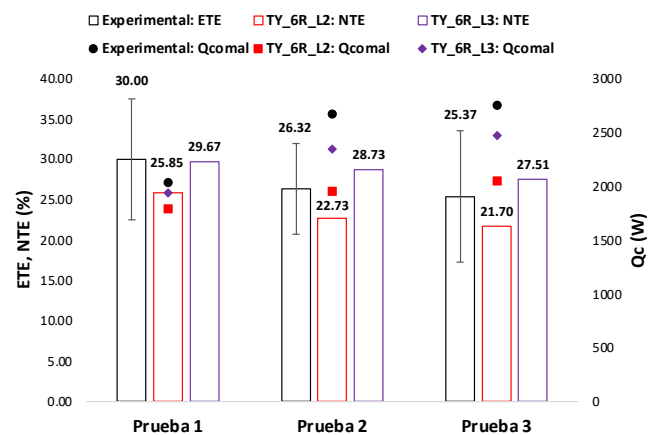


Figura 2. Eficiencia térmica y calor del comal para mediciones experimentales y casos numéricos para las Pruebas 1, 2 y 3

Desempeño térmico

La Figura 3 muestra la comparación entre la termografía experimental y los contornos numéricos del comal para las 3 pruebas de la estufa Tuya. Los rangos de temperatura para el comal metálico de la estufa van de 300 K a 900 K con la excepción de la Prueba 3 del caso TY_6R_L3 donde la mayor temperatura es de 920 K. En la Tabla 4 se reportan las temperaturas promedio del comal para las 3 pruebas en las imágenes termográficas y los casos numéricos, el rango de diferencias observado fue de <1 a 9%.

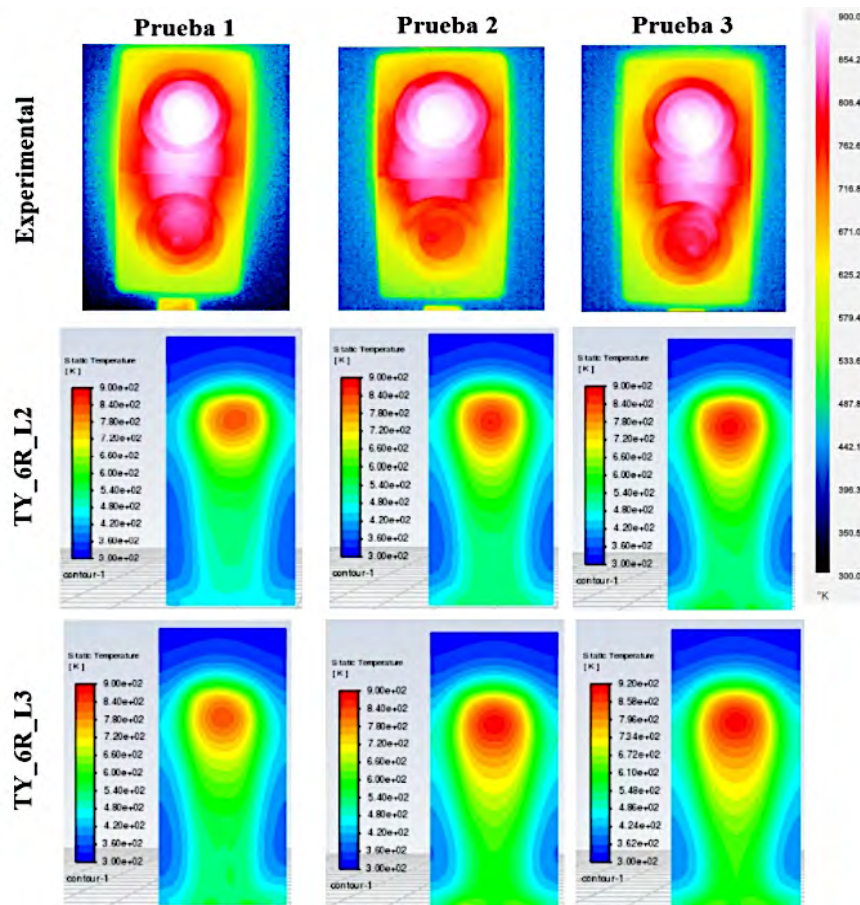


Figura 3. Termografía experimental vs. contornos numéricos del comal metálico para las Pruebas 1, 2 y 3. Nota. Los contornos numéricos muestran cada uno su respectiva escala de temperatura, la escala de la termografía experimental se muestra en la esquina superior derecha

Tabla 4. Comparación de la temperatura promedio del comal entre resultados experimentales y casos numéricos para las 3 pruebas.

Caso	Prueba 1 T comal (K)	Prueba 2 T comal (K)	Prueba 3 T comal (K)
Experimental	458 ± 48	508 ± 47	514 ± 49
TY_6R_L2	487 ± 127	507 ± 134	520 ± 140
TY_6R_L3	502 ± 126	538 ± 142	551 ± 148
Diferencias (%)	(6, 9)	(<1, 6)	(1, 7)

Emisiones de CO₂e

La Tabla 5 muestra la comparación de factores de emisión (expresados como gramos de contaminante por kilogramo de leña) de CO₂, CO, CH₄, NO_x y PM, así como la contribución de CO₂e para los 2 casos numéricos en comparación con los resultados experimentales de la estufa Tuya. El caso numérico TY_6R_L2 mostró mayores diferencias en relación con los factores de emisión experimentales con un rango de 23 a 84%, mientras que el rango para el caso TY_6R_L3 fue de 14 a 34%. La misma tendencia fue observada en la comparación de kgCO₂e/kg en la cual se reportan diferencias de 35 y 19% para los casos TY_6R_L2 y TY_6R_L3, respectivamente.

Tabla 5. Comparación de los factores de emisión de contaminantes y de CO₂e

Caso	Prueba	CO ₂ (g/kg)	CO (g/kg)	CH ₄ (g/kg)	NO _x (g/kg)	EC-PM (g/kg)	kgCO ₂ e/kg
TY_6R_L2	1	775	21	5.50	0.20	0.18	0.51
	2	729	13	1.26	0.20	0.18	0.37
	3	1083	9	1.05	0.16	0.18	0.44
TY_6R_L3	1	1306	15	0.61	0.28	0.15	0.47
	2	1182	12	0.76	0.36	0.34	0.58
	3	1249	13	0.54	0.36	0.36	0.60
Experimental (Johnson <i>et al.</i> , 2008)	-	1445 ± 27	19 ± 6	0.42 ± 0.21	0.48 ± 0.39	0.39 ± 0.19	0.68 ± 0.13
TY_6R_L2	Promedio	862	14	2.61	0.19	0.18	0.44
TY_6R_L3		1245	13	0.64	0.33	0.28	0.55
Diferencias (%)	-	(40,14)	(23,28)	(84,34)	(61,31)	(54,28)	(35,19)

Nota. Las emisiones experimentales de EC se refieren a carbono negro reportadas por Ruiz-García *et al.* (Johnson *et al.*, 2008).

Análisis de sensibilidad de malla

La Tabla 6 muestra la comparación entre la malla utilizada para los casos numéricos y 2 casos con un menor número de elementos. Los resultados muestran que no existen diferencias significativas en las 4 variables comparadas: NCE, NTE, calor del comal y temperatura promedio del comal. El rango de diferencias encontrado fue de 0.3% a 2%.

Tabla 6. Análisis de sensibilidad para las eficiencias NCE-NTE, calor del comal y temperatura promedio del comal

Malla	Elementos	NCE (%)	NTE (%)	Qc (W)	T comal (K), prom.
Actual	1,017,800	98.36	27.51	2473	551
Caso 1	882,330	96.40	27.20	2445	553
Diferencia (%)	13	2	1	1	0.3
Caso 2	768,482	96.97	28.06	2524	562
Diferencia (%)	24	1	2	2	2.0

Discusión

Comparación entre casos numéricos

La comparación entre los dos casos numéricos muestra la influencia del coeficiente de exceso de aire (λ) en el rendimiento global de la estufa de biomasa. En el rendimiento energético, utilizando $\lambda = 3$ en el caso TY_6R_L3, se observa un incremento tanto en la NTE como en el calor del comal (Q_c) obteniendo un incremento de hasta un 21 y 17%, respectivamente. En cuanto a los parámetros de emisiones, los flujos máscicos muestran que el caso TY_6R_L3 presenta mayores emisiones de CO_2 lo que teóricamente se reflejaría en una combustión más completa, sin embargo, las diferencias en los valores de NCE no fueron significativas. Las emisiones de PIC's mostraron una reducción del 37 y 10% en las Pruebas 1 y 2, respectivamente, al utilizar $\lambda = 3$. Sin embargo, en la Prueba 3 se presentó un incremento del 24% de emisiones de PIC's en el caso TY_6R_L3 lo que posiblemente se puede explicar debido a las altas emisiones de CO en dicha prueba.

En general, los resultados de la comparación de los casos numéricos muestran que λ tiene un efecto significativo en la mejora tanto de la transferencia de calor como del proceso de combustión de la IBS Tuya. Medina *et al.*, (Medina *et al.*, 2024) reportaron resultados similares al utilizar diferentes valores de exceso de aire en el rendimiento de una estufa tipo plancha encontrando que $\lambda = 3$ es un valor óptimo para mejorar la eficiencia global de una IBS. Koppejan y Van Loo (Koppejan & Van Loo, 2012) reportan que los sistemas térmicos de combustión de biomasa a pequeña escala como las IBS, necesitan un coeficiente de exceso de aire superior a 2 para optimizar su rendimiento general.

Validación de resultados numéricos

Comparación de parámetros globales. La comparación de flujos máscicos de CO_2 , CO y NO_x entre el caso numérico TY_6R_L2 y las mediciones experimentales muestra diferencias significativas. Las mayores diferencias fueron reportadas en las emisiones de NO_x lo cual se puede explicar por el contenido de nitrógeno de la biomasa de las mediciones experimentales y el porcentaje utilizado en las simulaciones numéricas (Medina *et al.*, 2025). En el caso TY_6R_L3 se observaron las menores diferencias en la comparación de los flujos de CO, para el caso del CO_2 , la menor diferencia encontrada fue del 34%. De este último resultado se puede inferir que el coeficiente $\lambda = 3$ promueve la combustión completa y las emisiones de CO_2 . A su vez, en el modelo de combustión se utiliza una reacción adicional para la formación de CO_2 (R4) lo que podría explicar de igual manera los mayores flujos máscicos en relación con estudios similares (Medina *et al.*, 2021).

Para las eficiencias térmica y de combustión y el calor del comal (Q_c) los dos casos numéricos reportaron diferencias aceptables en relación con los resultados experimentales. En el caso de la NCE las diferencias fueron del 1-5%, esto se considera como uno de los hallazgos clave de este estudio debido a la relevancia de la eficiencia de combustión en el rendimiento de la estufa. La NCE también pudo verse favorecida al utilizar el exceso de aire $\lambda = 2$ y 3 con lo cual se asegura el tiro forzado y por ende la mejora de la eficiencia de combustión. En particular, el modelo TY_6R_L3 muestra una mayor similitud con la medición experimental de ETE y Q_c lo que se puede atribuir a una mejora del flujo de calor en la cámara de combustión y a una mejor distribución de la temperatura en el comal de la estufa utilizando $\lambda = 3$.

Desempeño térmico. La mejora en el desempeño térmico es probablemente el resultado más notorio de este trabajo cuando se comparan los contornos numéricos de estudios que han utilizado un modelo de combustión de 1 reacción (Medina *et al.*, 2021; Medina *et al.*, 2022; Galindo *et al.*, 2024; Gómez-Heleria *et al.*, 2023). Esta afirmación se puede corroborar en la Figura 3 en donde se observa una clara similitud entre los resultados de los 2 casos numéricos y la termografía experimental. De igual manera, las diferencias en la temperatura promedio del comal metálico, muestran valores de <1 a 9% (ver Tabla 4) con lo cual se demuestra que el modelo numérico de transferencia de calor predice de forma acertada el experimental. En particular, el caso numérico TY_6R_L3 reporta una mejor distribución de la temperatura en la superficie del comal lo cual se puede explicar debido a que el exceso de aire primario y secundario ($\lambda = 3$) optimizan el flujo de calor a lo largo del cuerpo de la estufa.

Comparación de emisiones de CO_2 . Los resultados de los factores de emisión muestran que el caso numérico TY_6R_L3 presenta las menores diferencias en relación con los experimentales. En el caso particular del CO_2 , se encontró la diferencia más cercana (14%) lo que ratifica la influencia del tiro forzado en la eficiencia de combustión.

Para el metano (CH_4) el cual es un importante gas de efecto invernadero, se observan valores de 2.61 y 0.64 g/kg para los casos TY_6R_L2 y TY_6R_L3, respectivamente, por lo que se puede mencionar que el valor de $\lambda = 3$ optimiza el proceso de combustión y reduce dichas emisiones.

En el caso de las emisiones de CO_2e se obtuvieron diferencias del 35 y 19% para los casos numéricos TY_6R_L2 y TY_6R_L3, respectivamente, comparados con el valor experimental de $0.68 \pm 0.13 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$. La relevancia de esta comparación radica en que el modelo numérico de 6 reacciones predice de manera aceptable la contribución al cambio climático de una estufa eficiente de biomasa. Es importante mencionar que se observa una diferencia del 36% entre los casos TY_6R_L3 y TY_6R_L2 para el factor de emisión de PM lo cual explica que el caso TY_6R_L3 presente una mayor contribución de CO_2e a pesar del valor del coeficiente λ .

Limitaciones y trabajo futuro. Una de las principales limitaciones de este trabajo es el tamaño de muestra ($N = 1$) de las mediciones experimentales lo que supone que los resultados de los principales parámetros tales como ECE y ETE presenten una incertidumbre significativa. Para los casos numéricos, los autores de este trabajo sugieren que es necesario incrementar el número de simulaciones por cada caso y al menos tener un set de 3 repeticiones ($N = 3$) lo cual posiblemente favorezca la comparación con los resultados reportados en bibliografía. En este sentido, para dar mayor validez a las comparaciones numéricas vs experimentales, es necesario utilizar una prueba estadística la cual determine si las diferencias reportadas son estadísticamente significativas o no. Se debe continuar explorando la mejora del modelo de combustión de estufas eficientes de biomasa en estudios numéricos CFD. Si bien el modelo de 6 reacciones presenta una correlación aceptable con los resultados experimentales, siguen existiendo puntos importantes a corregir como el caso de reducir las diferencias en los flujos máxicos de emisiones contaminantes.

Conclusiones

El presente trabajo representa un avance significativo en el análisis y comprensión del proceso de combustión de una estufa eficiente de biomasa. El modelo de 6 reacciones implementado en la estufa de biomasa Tuya predice de forma aceptable la eficiencia global, la transferencia de calor en el interior del cuerpo de la estufa y las emisiones de CO_2e .

Los principales hallazgos se mencionan a continuación.

- La comparación de los dos casos numéricos muestra que un valor de $\lambda = 3$ en el caso TY_6R_L3 mejora las emisiones de CO_2 al igual que la NCE, NTE y Qc.
- La validación de resultados entre los casos numéricos y mediciones experimentales mostró que, si bien existen diferencias significativas en los flujos máxicos de emisiones de CO y NO_x , otras variables de fundamental importancia como las eficiencias de combustión y térmica y las emisiones de CO_2 se encontraron diferencias aceptables particularmente en el caso TY_6R_L3.
- Los contornos numéricos del comal para el caso TY_6R_L3 en comparación con la termografía experimental muestra una evidente similitud lo cual representa un importante avance si se consideran los resultados previamente publicados en estudios similares para IBS tipo plancha.
- Los resultados de los factores de emisión y de emisiones de CO_2e acorde con la validación de otros parámetros, muestra una diferencia del 19% en relación con resultado experimental. Se puede concluir entonces, que el modelo de combustión fue implementado de manera correcta y que es posible utilizar una herramienta computacional para predecir la contribución al cambio climático de una estufa de biomasa.

Bibliografía

- Armendáriz-Arnez, C., Edwards, R. D., Johnson, M., Rosas, I. A., Espinosa, F., & Masera, O. R. (2010). Indoor particle size distributions in homes with open fires and improved Patsari cook stoves. *Atmospheric Environment*, 44(24), 2881–2886. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.049>
- Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A., & Masera, O. (2015). The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nature Climate Change*, 5(3), 266–272. <https://doi.org/10.1038/nclimate2491>
- Berrueta, V. M., Edwards, R. D., & Masera, O. R. (2008). Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, 33(5), 859–870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>
- Chen, T., Li, T., Sjöblom, J., & Ström, H. (2021). A reactor-scale CFD model of soot formation during high-temperature pyrolysis and gasification of biomass. *Fuel*, 303, 121240. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121240>

- Cruz Montelongo, C. D. L., Herrera Gamboa, J., Ortiz Sánchez, I. A., Ríos Saucedo, J. C., Rosales Serna, R., & Carrillo-Parra, A. (2020). Energy characterization of charcoal produced in North Central México. *Madera y bosques*, 26(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621971>
- De Jong, W., & Van Ommen, J. R. (2014). *Biomass as a sustainable energy source for the future: fundamentals of conversion processes*. John Wiley & Sons.
- FAO. (s.f.) Capítulo 1. LOGISTICA DE UNA PRODUCCION DE CARBON VEGETAL. <https://www.fao.org/4/x5328s/X5328S02.htm#:~:text=Se%20supone%20que%20la%20eficiencia,de%20madera%20seca%20al%20ho> rno. Acceso: 1 de mayo de 2025.
- Filipe dos Santos Viana, H., Martins Rodrigues, A., Godina, R., Carlos de Oliveira Matias, J., & Jorge Ribeiro Nunes, L. (2018). Evaluation of the physical, chemical and thermal properties of Portuguese maritime pine biomass. *Sustainability*, 10(8), 2877. <https://doi.org/10.3390/su10082877>
- Galindo, Y., Gómez-Helería, D., González, J. N., & Bustamante, C. A. (2025). CFD simulation and implementation of a griddle-type biomass stove for rural communities. *Revista Mexicana de Física*, 71(1 Jan-Feb), 010602-1. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.71.010602>
- GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2023. GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2023. <https://www.worldbioenergy.org/uploads/231219%20GBS%20Report.pdf> Acceso: 9 de abril de 2025.
- Gómez-Helería, D., Núñez, J., Fisher, E. M., Ruiz-García, V. M., & Beltrán, A. (2023). Steady-state behavior of a biomass plancha-type cookstove: Experimental and 3D numerical study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57, 103172. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103172>
- Grieshop, A. P., Marshall, J. D., & Kandlikar, M. (2011). Health and climate benefits of cookstove replacement options. *Energy Policy*, 39(12), 7530–7542. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.024>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014, Technical Report*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf Acceso: 1 de mayo de 2025.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf Acceso: 1 de mayo de 2025.
- Jetter, J., Zhao, Y., Smith, K. R., Khan, B., Yelverton, T., DeCarlo, P., & Hays, M. D. (2012). Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards. *Environmental science & technology*, 46(19), 10827–10834. <https://doi.org/10.1021/es301693f>
- Jobaidur, K., & Ting, W. (2013). Implementation of a demoisturization and devolatilization model in multi-phase simulation of a hybrid entrained-flow and fluidized bed mild gasifier. *International Journal of Clean Coal and Energy*, 2013. <http://dx.doi.org/10.4236/ijcce.2013.23005>
- Johnson, M., Edwards, R., Berrueta, V., & Masera, O. (2010). New approaches to performance testing of improved cookstoves. *Environmental science & technology*, 44(1), 368–374. <https://doi.org/10.1021/es9013294>
- Johnson, M., Edwards, R., Frenk, C. A., & Masera, O. (2008). In-field greenhouse gas emissions from cookstoves in rural Mexican households. *Atmospheric Environment*, 42(6), 1206–1222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.034>
- Kang, M. S., Jeong, H. J., Farid, M. M., & Hwang, J. (2017). Effect of staged combustion on low NOx emission from an industrial-scale fuel oil combustor in South Korea. *Fuel*, 210, 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.065>
- Koppejan, J., & Van Loo, S. (2012). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.
- Kumar, U., & Paul, M. C. (2019). CFD modelling of biomass gasification with a volatile break-up approach. *Chemical Engineering Science*, 195, 413–422. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.038>
- Lammel, G., & Graßl, H. (1995). Greenhouse effect of NOx. *Environmental Science and Pollution Research*, 2, 40–45. <https://doi.org/10.1007/BF02987512>
- Lee, H. K., Choi, S. M., & Kim, B. K. (2010). Understanding coal gasification and combustion modeling in general purpose CFD code. *Journal of the Korean Society of Combustion*, 15(3), 15–24. https://koreascience.kr/ksci/search/article/articleView.ksci?articleBean.atclMgntNo=OSHHB6_2010_v15n3_15
- Liu, H., Cattolica, R. J., & Seiser, R. (2016). CFD studies on biomass gasification in a pilot-scale dual fluidized-bed system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28), 11974–11989. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.205>
- MacCarty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T., & Roden, C. (2008). A laboratory comparison of the global warming impact of five major types of biomass cooking stoves. *Energy for sustainable development*, 12(2), 56–65. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60429-9](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60429-9)
- Marangwanda, G. T., Madyira, D. M., & Babarinde, T. O. (2020). Combustion models for biomass: A review. *Energy Reports*, 6, 664–672. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.135>
- Medina, P. (2017). Evaluación de la contribución de emisiones y de los parámetros de rendimiento de las estufas eficientes de leña mediante los protocolos WBT/CCT y durante ciclos de cocinado controlado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posgrado de Ingeniería Química. Tesis de Doctorado. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/5718/1/FIQ-D-2017-0397.pdf
- Medina, P., Beltrán, A., Núñez, J., & Ruiz-García, V. M. (2022). Transport phenomena in a biomass plancha-type cookstove: Experimental performance and numerical simulations. *Energy for Sustainable Development*, 71, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.09.019>
- Medina, P., Mora, A., & Beltrán, A. (2024). Combustion efficiency and CO/NOx emissions for a biomass plancha-type stove: Effect of the air excess ratio. *Thermal Science and Engineering Progress*, 48, 102411. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102411>
- Medina, P., Mora, A., & Beltrán, A. (2025). Improvement of the combustion model for a biomass stove: analysis of overall efficiency and thermal performance. Submitted to *Renewable Energy*, 13th April 2025. Manuscript number: RENE-D-25-04656. <https://track.authorhub.elsevier.com/?uuiid=73f4728a-baeb-47b2-b2ec-803095c5ffbe>
- Medina, P., Núñez, J., Ruiz-García, V. M., & Beltrán, A. (2021). Experimental and numerical comparison of CO₂ mass flow rate emissions, combustion and thermal performance for a biomass plancha-type cookstove. *Energy for Sustainable Development*, 63, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.07.001>
- Núñez, J., Moctezuma-Sánchez, M. F., Fisher, E. M., Berrueta, V. M., Masera, O. R., & Beltrán, A. (2020). Natural-draft flow and heat transfer in a plancha-type biomass cookstove. *Renewable Energy*, 146, 727–736. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.007>

- Patange, O. S., Ramanathan, N., Rehman, I. H., Tripathi, S. N., Misra, A., Kar, A., ... & Ramanathan, V. (2015). Reductions in indoor black carbon concentrations from improved biomass stoves in rural India. *Environmental science & technology*, 49(7), 4749–4756. <https://doi.org/10.1021/es506208x>
- Pérez, G., Islas-Samperio, J. M., Grande-Acosta, G. K., & Manzini, F. (2022). Socioeconomic and environmental aspects of traditional firewood for cooking on the example of rural and peri-urban Mexican households. *Energies*, 15(13), 4904. <https://doi.org/10.3390/en15134904>
- Ruiz-García, V., Medina, P., Vázquez, J., Villanueva, D., Ramos, S., & Masera, O. (2021). Bioenergy devices: energy and emissions performance for the residential and industrial sectors in Mexico. *BioEnergy Research*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10362-5>
- Sadaka, S., & Johnson, D. M. (2011). *Biomass Combustion*. Cooperative Extension Service, University of Arkansas. US Department of Agriculture and county governments cooperating. https://www.researchgate.net/publication/278965157_Biomass_Combustion
- Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Berrueta, V. M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V. M., Ghilardi, A., & Masera, O. (2018). Promoting LPG, clean woodburning cookstoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental Research Letters*, 13(11), 115004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad5b8>
- Somwangthanaroj, S., & Fukuda, S. (2020). CFD modeling of biomass grate combustion using a steady-state discrete particle model (DPM) approach. *Renewable Energy*, 148, 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.042>
- Su, X., Ma, L., Fang, Q., Yin, C., Zhuang, H., Qiao, Y., ... & Chen, G. (2024). Optimizing biomass combustion in a 130 t/h grate boiler: Assessing gas-phase reaction models and primary air distribution strategies. *Applied Thermal Engineering*, 238, 122043. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122043>
- Tu, Y., Xu, M., Zhou, D., Wang, Q., Yang, W., & Liu, H. (2019). CFD and kinetic modelling study of methane MILD combustion in O₂/N₂, O₂/CO₂ and O₂/H₂O atmospheres. *Applied energy*, 240, 1003–1013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.046>
- Yang, M., Zhong, S., Xu, S., Xu, L., Ottosson, P., Fatehi, H., & Bai, X. S. (2023). CFD Simulation of Biomass Combustion in an Industrial Circulating Fluidized Bed Furnace. *Combustion Science and Technology*, 195(14), 3310–3340. <https://doi.org/10.1080/00102202.2023.2260553>
- Zadravec, T., Rajh, B., Kokalj, F., & Samec, N. (2020). CFD modelling of air staged combustion in a wood pellet boiler using the coupled modelling approach. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20, 100715. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100715>
- Zeng, K., Minh, D. P., Gauthier, D., Weiss-Hortala, E., Nzihou, A., & Flamant, G. (2015). The effect of temperature and heating rate on char properties obtained from solar pyrolysis of beech wood. *Bioresource technology*, 182, 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.112>

Una experiencia formativa con finalidad sustentable: construcción con segmentos longitudinales de tallo de bambú

Alfonso Rivas-Cruces ^{1,*}, José Juan Guerrero-Correa ² y Mario S. Ramírez-Centeno ²

¹ Laboratorio de Estudios del Hábitat Sustentable, Departamento de Medio Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Ciudad de México, México

² Laboratorio de Estructuras, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, Ciudad de México, México

* Autor de correspondencia: arc@azc.uam.mx; Tel.: (52)5514744223

Desarrollo Sustentable (Materiales sustentables)

Recibido: 5 de junio de 2025

Aceptado: 13 de agosto de 2025

Publicado: 8 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.472>

Resumen: La formación de arquitectos e ingenieros en el diseño y construcción con bambú es una asignatura pendiente en su instrucción profesional en México. El bambú es una planta de rápida reproducción que aporta servicios ecosistémicos y favorece a la sustentabilidad. El territorio nacional dispone de las condiciones climáticas para el crecimiento de especies leñosas de bambú. Desde Sonora y Tamaulipas se distribuye sobre las vertientes del Golfo de México y Océano Pacífico. Actualmente se han identificado 34 plantaciones comerciales a lo largo de ambos ejes, con costos competitivos frente a otros materiales como la madera. La metodología de trabajo para generar una experiencia formativa en la aplicación constructiva con tallos de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth, consistió en segmentarlos a lo largo del eje longitudinal del tallo, tanto en sentido radial, como paralelo. Se realizaron pruebas de corte en estas trayectorias. Se observó la curvatura formada por la inclinación de los segmentos radiales y la geometría orgánica interna obtenida del corte paralelo. Estos hallazgos afianzaron dos soluciones de diseño instaladas actualmente en el recinto universitario: una cubierta curva denominada “el Caparazón”, hecha por segmentos longitudinales radiales -latas de bambú; y mamparas a base de “corazones de bambú” formadas con segmentos de corte longitudinal paralelo. El caparazón ocupa en su base una superficie de 13.6 m² y en el punto más alto mide 3.40 m. Se utilizaron 62 bambúes de 6 m, para su construcción. Esto equivale a 372 metros lineales, a una masa total de 818 kg, y su costo fue de \$28,272.00 pesos. Se construyó y desarmó, clasificando todas sus partes y componentes y se programó un taller participativo con 20 alumnos de arquitectura e ingeniería. El aprendizaje de los alumnos en el uso del bambú ocurrió a través de la colaboración en el proceso de manufactura e instalación de ambos diseños. Se comprobó la factibilidad constructiva de la segmentación longitudinal del tallo de bambú para generar estructuras con forma curva y geometrías orgánicas. La experiencia también confirmó la idoneidad y viabilidad de la enseñanza y aplicación del bambú en la formación profesional.

Palabras clave: Bambú, Segmentos longitudinales, Estructuras curvas, Formación profesional, *Guadua angustifolia*

A training experience with a sustainable purpose: Construction with longitudinal segments to the bamboo stem

Abstract: The training of architects and engineers in bamboo design and construction is a pending subject in their professional training in Mexico. Bamboo is a rapidly reproducing natural material that provides ecosystem services and promotes sustainability. The national territory has the climatic conditions for the growth of woody bamboo species. From Sonora to Tamaulipas, they are located along the slopes of the Gulf of Mexico and the Pacific Ocean. Currently, 34 commercial plantations have been identified along both axes, with competitive costs compared to other materials such as wood. The working methodology for generating a training experience in the constructive application of bamboo stems of the *Guadua Angustifolia* Kunth species, consisted of segmenting them along the longitudinal axis of the stem, both radially and parallel. Cutting tests were performed on these trajectories. The curvature formed by the slanting of the radial segments and the internal organic geometry obtained from the parallel cut were observed. These findings strengthened two design solutions currently installed on the university campus: a curved roof called “the shell,” made of radial longitudinal segments -bamboo strips; and another solution for screens based on “bamboo hearts” formed with parallel longitudinal cut segments. The shell occupies an area of 13.6 m² at its base and measures 3.40 m at its highest point. Sixty-two 6-m bamboo poles were used for its construction. This equates to 372 linear meters, a total mass of 818 kg, and a cost of \$28,272.00 pesos. It was built and disassembled, all its parts and components classified, and a participatory workshop was held with architecture and engineering students. Students learned how to use bamboo through collaboration in the manufacturing and installation process of both designs. The constructive feasibility of longitudinal segmentation of the bamboo stem to generate structures with curved shapes and organic geometries was verified. The experience also confirmed the suitability and viability of teaching and applying bamboo in vocational training.

Keywords: Bamboo, Longitudinal segments, Curved structures, Vocational training, *Guadua angustifolia*

Introducción

El diseño de espacios habitables requiere incorporar materiales de construcción renovables de origen biológico, amigables con el ambiente, que no contaminen y aporten a la mitigación de emisiones de CO₂. El bambú es un material sustentable que genera altos rendimientos en su producción. Crece en un periodo breve, cercano a 4 meses, en el que logran alturas de 15 a 30 m, según la especie (Dauletбек, 2022). Mientras que alcanza su desarrollo en 5 o 6 años (Cuenca, *et al.* 2020) su periodo de cosecha para uso en la construcción es factible desde los 3 años (Hidalgo, 2003). La demanda de energía de los edificios y los procesos del sector de la construcción contribuyen al 37% de las emisiones globales de CO₂. (UNEP, 2024a). Cerca del 27% se debe a la demanda de energía de los edificios, mientras que la diferencia corresponde a los procesos de manufactura de concreto, acero y aluminio. La fabricación de materiales plásticos, telas, espumas entre otros, no forma parte de este porcentaje. Para cumplir con las metas climáticas globales de 1.5°C la industria de la construcción y de las edificaciones debe disminuir o prescindir de los combustibles fósiles. En este sentido, se estima que hay un potencial de mitigación de emisiones de CO₂ para el 2035 del 11%, de actuar en esta dirección (UNEP, 2024b). El bambú no emite CO₂, lo absorbe. Los cultivos de bambú son sumideros naturales de carbono (Marchi *et al.*, 2023). La capacidad de asimilación del CO₂ durante el proceso fotosintético responde a la densidad de los bambusales (Aguirre-cárdenas *et al.*, 2018), que casi pueden duplicar su biomasa en un periodo de 7 años (Camargo *et al.*, 2010), lo que les hace ser una opción valiosa para la captura de carbono. Además, los servicios ecosistémicos del bambú, no sólo se circunscriben a la bio-remediación del ambiente, desempeña un papel básico en la economía y cultura de las zonas donde se localiza; ya sea como provisión de alimentos, material para la construcción, combustible, mobiliario, artesanías, textiles, papel; o como medio de regulación y mantenimiento para la protección de riveras y cuerpos de agua, aporte de material orgánico, restauración de suelo y reforestación rápida entre otras cosas (Cruz-Armendáriz *et al.* 2023, Marchi *et al.* 2023; Ruiz-Sánchez, 2019).

La formación profesional de arquitectos e ingenieros requiere diseñar con materiales renovables como el bambú. Su aprendizaje es una alternativa sostenible que puede reemplazar el uso exacerbante de los materiales de construcción tradicionales. Sin una deliberada incorporación de materiales sustentables en su formación profesional, el pronóstico de impacto ambiental por la industria de la construcción continuará siendo adverso, persistiendo las emisiones de CO₂ y el consecuente calentamiento global. Hasta ahora, no se está alcanzando la meta trazada en el acuerdo de París, de limitar el incremento de temperatura por debajo de los 2°C, para el año 2100 (UNEP. 2023). El uso de materiales naturales como el bambú es una alternativa en el diseño de espacios habitables.

El bambú tiene especies nativas en todos los continentes, salvo Europa. Pertenece a la familia botánica de las Poaceas o Gramíneas -como el césped, el maíz, el trigo o la caña de azúcar- y a la subfamilia de las Bamabusoidae. La línea evolutiva del bambú se diferencia en herbáceas (Tribu Olyreae) y leñosos templados y tropicales (tribu Arundinariae y Bambuseae, respectivamente) (Cortes-Rodríguez, 2000; Kelchner, *et al.*, 2013; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2023). Los primeros se caracterizan por tener tallos delgados, no lignificados, con floración continua que en su mayoría no tienen hoja caulinar; mientras que los bambúes leñosos se caracterizan por tener tallos lignificados, hoja caulinar y florecen una vez en su vida -y después del cual mueren (Ruiz-Sánchez, 2019). El número de especies reconocidas y registradas está aumentado con rapidez. En 2013, Kelchner, S.A. y Bamboo Phylogeny Group reportaban más de 1450 especies; tres años después Ruiz-Sánchez refiere el trabajo de Vorontsova, M.S., *et al.* con más de 1650 especies. De manera semejante, en tan solo 18 años México pasó de 35 especies leñosas registradas (Cortes-Rodríguez, 2000) a 52 (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2019).

Con la excepción de cinco estados de la República Mexicana (Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Coahuila, y Tlaxcala.) existe al menos una especie leñosa o herbácea de bambú en el resto de los estados (Ruiz-Sánchez, 2015).

Los bambúes leñosos en México se distribuyen en áreas bióticas con altitudes a partir del nivel del mar hasta los 3,200 m.s.n.m. Las condiciones climáticas favorables para su crecimiento son diversas según el tipo de especie, e incluye a los bosques tropicales caducifolio, subcaducifolio y perennifolio, a los bosques de pino y encino, al bosque mesófilo de montaña, así como a la vasta zona de matorral xerófilo y la reducida superficie de vegetación sabanoide del país (Ruiz-Sánchez, 2023). Se observa mayor presencia de especies de bambú sobre los estados del eje del Golfo de México y del Océano Pacífico. La Tabla 1 muestra las especies nativas en ambas vertientes que comúnmente se ocupan para uso estructural u ornamental.

Tabla 1. Especies de bambú nativas de México, según uso y localización

No.	NOMBRE DE LA ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USO RECOMENDADO	LOCALIZACIÓN (Vertiente)																							
				Golfo de México						Océano Pacífico																	
				CAM	HGO	PUE	SLP	TAB	TM	VER	CHIH	CHIS	COL	DGO	GRO	JAL	MICH	NAY	OAX	SIN	YUC						
1	<i>Guadua aculeata</i>	Tarro	Estructural					☑	☑			☑	☑					☑									
2	<i>Guadua amplexifolia</i>	Caña vaquera	Estructural			☑					☑		☑					☑							☑		☑
3	<i>Guadua longifolia</i>	Caña brava	Estructural		☑						☑		☑					☑									
4	<i>Guadua paniculata</i>	Otate dulce	Estructural							☑			☑					☑						☑	☑		
5	<i>Guadua velutina</i>	Caña mansa	Estructural							☑	☑	☑	☑	☑										☑			
6	<i>Otatea acuminata</i>	Otate	Ornamental / Estructural			☑							☑		☑	☑	☑	☑			☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
7	<i>Rhipidocladum racomiflorum</i>	Chiquian	Ornamental										☑	☑													

Elaborado con información de: Comisión Nacional Forestal (2002); Cortés Rodríguez, G.R. (2000); Cruz-Armendáriz, N. M., et al. (2023); Lucila Aguilar Arquitectos (2020); Moreno-Martínez J.L., et al. (2018); Ruiz-Sánchez, E. et al., (2023).

La especie *Otatea acuminata* está presente en once estados de México y su uso en la construcción de viviendas data desde la época prehispánica (Ruiz-Sánchez, et al., 2019).

En la actualidad la *Guadua aculeata* se utiliza en la construcción de vivienda en Chiapas y Veracruz (Ibid), sin embargo, se tiene evidencias del uso de G. Amplexifolia, G. Paniculata y G. Velutina en la construcción de viviendas con la técnica de bahareque (Ruiz-Sánchez, et al., 2023). Además de las especies nativas, la Tabla 2 presenta el conjunto de especies introducidas a México. La *Guadua angustifolia* Kunth y *Bambusa oldhamii*, para uso estructural, son las especies de mayor presencia en los estados que la comercializan.

Tabla 2. Especies de bambú introducidas en México, según uso y localización

No.	NOMBRE DE LA ESPECIE	NOMBRE COMÚN	USO RECOMENDADO	LOCALIZACIÓN (Vertiente)									
				Golfo de México				Océano Pacífico					
				PUE	SLP	TAB	VER	CHIS	COL	MOR	OAX		
1	<i>Bambusa oldhamii</i>	Oldhami	Estructural										
2	<i>Dendrocalamus asper</i>	Asper	Estructural										
3	<i>Dendrocalamus giganteus</i>	Dendrocalamus	Estructural										
4	<i>Guadua angustifolia</i>	Guadua	Estructural										
5	<i>Guadua inermis</i> E. Fourn	-	Estructural										
6	<i>Bambusa lako</i>	Timor Black	Ornamental										
7	<i>Bambusa multiplex</i>	-	Ornamental										
8	<i>Bambusa textilis</i>	Textilis	Ornamental										
9	<i>Bambusa vulgaris</i>	Caña brava / Tarro	Ornamental										
10	<i>Dendrocalamus strictus</i>	Bambú macho	Ornamental										
11	<i>Gigantochloa auriculata</i>	-	Ornamental										
12	<i>Phyllostachys aurea</i>	Plumoso	Ornamental										
13	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	Madake	Ornamental / Estructural										
14	<i>Phyllostachys pubescens</i>	Moso	Ornamental										

Elaborado con información de: Comisión Nacional Forestal, 2002; Cortés Rodríguez, 2000; Cruz-Armendáriz, et al., 2023; Aguilar, 2020; Moreno-Martínez, et al., 2018; Ruiz-Sánchez, et al., 2023.

Actualmente se han identificado 34 plantaciones comerciales establecidas formalmente (Aguilar, 2020; Cruz-Armendáriz et al., 2023). Están ubicadas predominantemente a lo largo del eje del Golfo de México, con costos competitivos frente a otros materiales como la madera.

Materiales y Métodos

La rigidez y resistencia del bambú rollizo ha sido examinada con detalle por un número importante de autores (Caori et al., 2004; Cely-Moreno et al., 2012; Guerrero et al., 2014; Ordóñez-Candelaria et al., 2014; Takeuchi et al., 2007); en cambio, su flexibilidad y ductilidad ha tenido menos atención (Ramírez, 2024). No obstante, estudios como el de

Obataya *et al.* (2007) refieren que las latas de bambú son flexibles cuando la capa rígida exterior del bambú queda expuesta a la tensión y la capa interior -más suave- está expuesta a la compresión. Su estudio comprobó que la combinación de la estructura celular, donde la parte exterior es rica en fibra y la parte interior comprimible contribuyen a una excelente ductilidad de las latas de bambú a la flexión. Aunque es necesario mayores estudios sobre este tema, es notoria la diversidad de soluciones constructivas en las que el uso del bambú en latas o reglillas se emplea para formar estructuras curvas.

El presente trabajo es parte del proyecto de investigación N-500, denominado “Ensamblajes y conexiones de módulos estructurales de bambú”. Se examinó la segmentación longitudinal del tallo de bambú, y constató que existen dos tipos de cortes longitudinales que pueden ser aplicados al bambú: Segmentación longitudinal radial y segmentación longitudinal paralela. En el primero caso, el corte radial divide el bambú en secciones más flexibles y dúctiles que el bambú rollizo. Por su morfología y condiciones física, el tallo de bambú no tiene la flexibilidad para adquirir una forma curva. Aunque existen métodos para formar elementos curvos con el bambú rollizo, se optó por examinar la ductilidad y flexibilidad que tiene la segmentación longitudinal radial, con el interés de generar vigas curvas con el bambú.

En el segundo caso, el corte longitudinal paralelo a la fibra genera tres tipos de productos. Cuando es cortado a la mitad, se obtienen medias cañas, y cuando es cortado en tercios se obtiene dos medios tercios de caña y un segmento con formas orgánicas -originadas por la membrana de cada nodo- que al agruparse con otros segmentos semejantes favorecen la ambientación de espacios interiores.

Los tallos de bambú con los cuales se realizaron las pruebas de corte longitudinal son de la especie *Guadua angustifolia* Kunth. Se ocuparon 45 tallos de 3.24 m. en el corte longitudinal paralelo y 7 bambúes de 6 m. de largo, para el corte radial. Todos seleccionados con un diámetro promedio de 90 mm, con una desviación estándar del 7.45%, y un contenido de humedad promedio del 7.58 % al momento de realizar los cortes longitudinales -seco, según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Madera y Bambú del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, 2023. Todos los bambúes han sido aclimatados, cultivados, cosechados, tratados y secados en la ciudad de Huatusco, Veracruz. Son tallos con más de 5 años de edad; tiempo apropiado para su uso en la construcción de estructuras.

Exploración para la obtención de segmentos longitudinales de bambú.

¿Es posible formar elementos estructurales curvos con segmentos longitudinales de bambú? En el medio de la construcción queda de manifiesto la respuesta. Sin embargo, el ejercicio de investigación consistió en responder esta interrogante para encauzar los resultados a una experiencia de formación académica. Se efectuaron los dos tipos de cortes longitudinales -radial y paralelo a la fibra- y con base a los resultados observados se desarrollaron dos diseños que optimizaron el aprovechamiento de los productos obtenidos en este proceso.

Segmentos longitudinales radiales de bambú

El corte de segmentos longitudinales radiales es convencionalmente identificado como reglilla o lata de bambú. Se inicio con un ejercicio de exploración cortando radialmente un tallo de bambú de 6 m. La Herramienta que se utiliza en el medio vernáculo para el corte radial del bambú se conoce como lateadora; en el medio de producción industrializada hay maquinaria especializada para efectuar el mismo trabajo de corte a gran escala (Botero-Cortes, 2004); En este caso, se utilizó como equipo de corte una sierra cinta marca: FUHO, modelo: pmc-f-300, de ½ H.P., con ancho de hoja de 3/8", ½" y ¾". La lateadora manual no resultó una opción adecuada debido a que el bambú disponible ya estaba tratado y secado y las lateadoras manuales se utilizan a tallos que aún están verdes. En este sentido, se pudo comprobar que la lateadora se deforma con facilidad cuando no es así. La sierra cinta permitió hacer cortes uniformes disminuyendo el desperdicio de tallos de bambú durante el proceso.

Todo inicia con la selección de las varas de bambú. Deben estar libres de rajaduras, humedad o alguna imperfección como huecos o aplastamiento. El tallo con 9 cm de diámetro promedio y seis metros de largo, se cortó en su sentido longitudinal por mitad y cada segmento se cortó por mitad nuevamente, repitiendo el mismo procedimiento una vez más a cada segmento, obteniendo ocho segmentos lineales en total. A todos les cepillaron el diafragma interno para

obtener elementos rectos y uniformes. En el mercado puede adquirirse la lata calibrada o sin calibrar, esto es, con las dos caras canteadas o si cantear (Bambuerver, s.f.).

Las latas utilizadas en este ejercicio quedaron sin calibrar, solo con las membranas cepilladas. Ya con el conjunto de latas de bambú cortadas y cepilladas se estudió la flecha que producía de manera natural al levantarla por uno de sus extremos. La forma observada se consideró para el diseño de la estructura denominada “El caparazón”.

Segmentos longitudinales paralelos de bambú

También se realizó la valoración de cortes longitudinales paralelos. En este caso, el tallo de bambú se cortó en tres partes iguales. El segmento intermedio revela formas orgánicas naturales, generadas por las membranas que tiene cada nodo, creando espacios vacíos de proporciones aparentemente regulares, pero diferentes. Ya existen casos en el mundo en el que el corazón del bambú o celosía (nombre comercial) se ha empleado para ambientar espacios, barandales y puertas, pero no existen evidencias escrita de esta experiencia en México.

Los dos segmentos restantes se aproximan a la forma de una media caña, y debido a las membranas internodales, mantienen una relativa rigidez al presentarlas libremente apoyadas en sus extremos con la cara exterior de la caña apuntando hacia arriba. Como es de suponerse, mientras más corto es el claro (la distancia libre entre dos puntos de apoyo estructural), menor la flecha de deformación. Con estas evidencias en mente, se consideró realizar el proyecto de cinco mamparas con corazones de bambú, para instalarse en el laboratorio de Estudios del Hábitat Sustentable, en la Universidad Autónoma Metropolitana de Azcapotzalco. Se ocuparon 45 corazones de bambú de 3.24 m de largo. Por cada corazón de bambú se obtuvieron dos elementos de tercios de caña que se incorporaron en el diseño de la cubierta del Caparazón. Con ello, se optimizó la cantidad de material empleado para la construcción de ambos proyectos.

El mérito de obtener los cortes longitudinales paralelos y perpendiculares en conformidad con lo diseñado, fue resultado de un minucioso proceso de medición y marcado, así como pruebas de práctica para obtener cortes precisos por parte de los alumnos de servicio social que de manera responsable realizaron los procedimientos de corte, mismos que son descritos a continuación.

Resultados y Discusión

Corte longitudinal paralelo para la obtención de los corazones de bambú.

Ya seleccionados los tallos se cortaron a la medida de diseño para las mamparas. El tallo presenta regularmente una trayectoria de doble curvatura, y aunque pueda ocurrir frecuentemente de manera discreta, la doble curvatura existe. Reconociendo esta condición que agrega complejidad al corte, se efectúa el trazo de dos líneas de corte paralelas y equidistantes -teniendo en cuenta el diámetro del tallo- sobre los cantos del tallo de bambú, y así obtener tres segmentos -ver Figura 1. El diámetro del tallo de bambú tuvo un rango promedio de 9 cm, por lo que el espesor de los corazones de bambú fue de 3 cm de espesor, y cualquier variación dimensional la tomaron los segmentos laterales.

Para este efecto, con un tiralíneas seguido de un gramil para bambú, se marcan las líneas de corte sobre el eje longitudinal; esto facilita la visibilidad, a todo lo largo del tallo, al momento del trabajo de corte. Tres personas participan en el corte del tallo en la sierra cinta. Una sostiene el tallo y, las otras dos, dirigen el tallo sobre las líneas previamente marcadas a través de la sierra. Se puede observar el resultado de los corazones de bambú en la Figura 2.

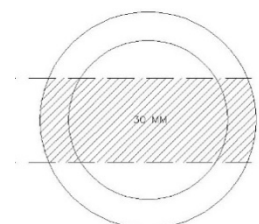


Figura 1. trazo de segmentos paralelos en el canto del bambú.

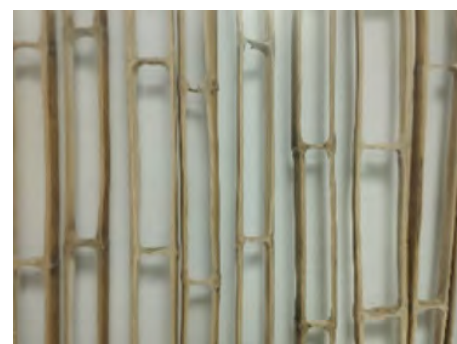


Figura 2. Corazones de bambú

Corte longitudinal radial para la obtención de vigas curvas

Una vez diseñado el “Caparazón” – el cual incluyó el despiece de los 90 segmentos laterales obtenidos con los cortes paralelos a la caña- se procedió a la selección del bambú de *Guadua angustifolia* Kunth. Se utilizaron cinco varas de bambú de 6m de longitud, para generar las cuatro vigas curvas que sustentan la cubierta para el proyecto del Caparazón. Se utilizó el mismo procedimiento de medición y corte descrito anteriormente. Los segmentos obtenidos tienen por la parte interior del tallo trozos triangulares, formados por la membrana internodal propia del bambú. Con la ayuda de una sierra caladora se desbastaron para obtener una superficie libre de protuberancias. Finalmente, se cepilló la membrana y la cara interior para obtener una superficie libre de asperezas y facilitar el acoplamiento de diez latas, las cuales se amarraron para formar las vigas curvas del Caparazón.

Diseño y construcción del “Caparazón”

El diseño del Caparazón se concibió a partir de observar la flecha formada por las latas de bambú al levantar uno de sus extremos. En la figura 3 se observa que está formado por 3 pares de marcos con alturas variables que sirven de soporte a 4 vigas hechas con latas de bambú. La curvatura de las vigas, está dada por la flexibilidad que tienen las latas de bambú y los marcos que la soportan.

En el trabajo titulado “Propiedades mecánicas del bambú”, Guerrero et. al, 2014, se reportaron las propiedades mecánicas y comportamiento estructural de culmos de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth. Las probetas fueron sujetas a tensión, compresión y cortante paralelo a la fibra y flexión de acuerdo a la normatividad ISO22157-1;2004(E).



Figura 3. Vista lateral del Caparazón.

El ensaye de tensión consistió en una probeta tipo lata que presenta un menor ancho en su parte media como se puede ver en la Figura 4.

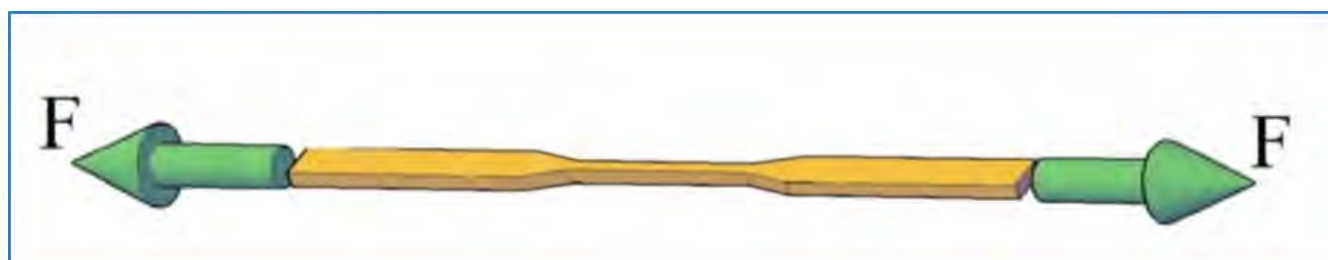


Figura 4. Esquema general de ensayos a tensión paralela a la fibra en culmos de bambú.

El tipo de falla que se presentó en la mayoría de las probetas fue debido a la tensión en la zona central calibrada de la probeta, la cual se presenta de manera súbita con una deformación muy pequeña antes de que esta ocurra. De acuerdo con los resultados obtenidos se presentó un esfuerzo normal a tensión promedio de $1,569.41 \text{ kg/cm}^2$, con un esfuerzo normal a tensión mínimo de 930 kg/cm^2 y un esfuerzo normal a tensión máximo de $2,368.42 \text{ kg/cm}^2$.

El ensaye de flexión consistió en una probeta con una longitud mínima de $30D$, donde D es el diámetro exterior de la probeta y aplicación de la carga a los tercios del claro de la viga como se puede ver en la Figura 5.

Se observó que las gráficas carga F -deformación vertical Δ al centro del claro- presentan una relación lineal prácticamente hasta el final del ensaye. Hay coincidencia, para la mayoría de los casos, que la carga en el límite proporcional sea igual a la carga máxima. De acuerdo con los resultados se obtuvo un esfuerzo normal promedio de 579.41 kg/cm^2 , con un esfuerzo normal mínimo de 337.05 kg/cm^2 y un esfuerzo normal máximo de 951.27 kg/cm^2 . Por

lo que respecta al módulo de elasticidad se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 170,890.34 kg/cm², con un módulo de elasticidad mínimo de 97,668.00 kg/cm² y un módulo de elasticidad máximo de 476,421.03 kg/cm².

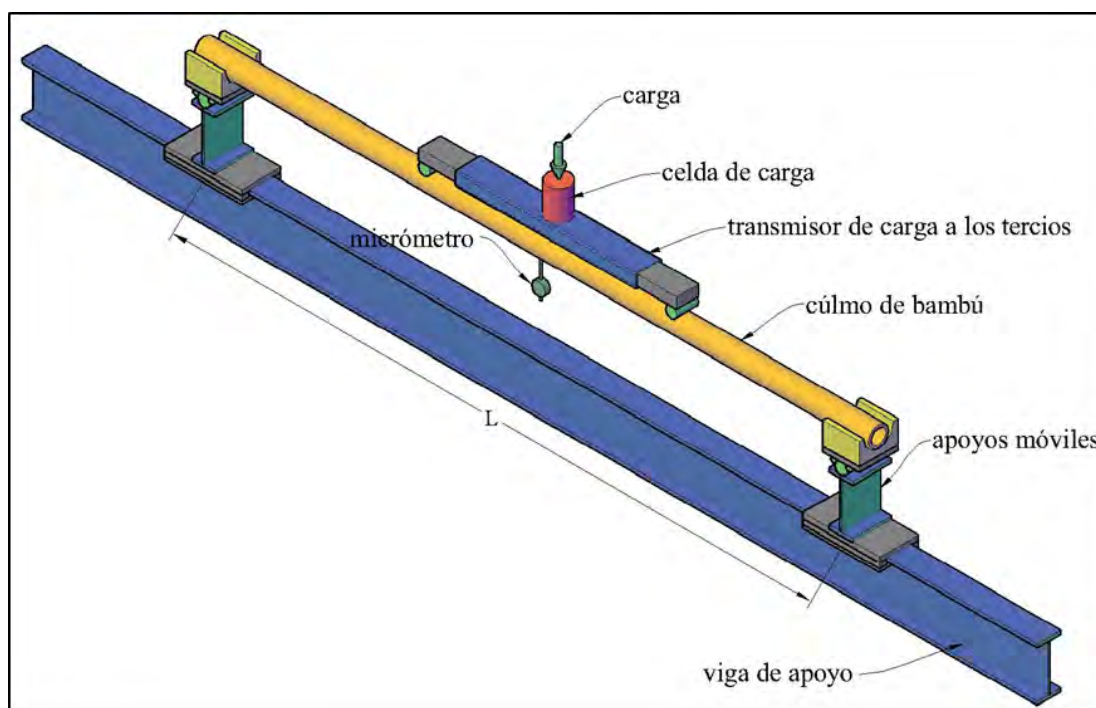


Figura 5. Esquema general de ensayos a flexión en culmos de bambú.

En el trabajo titulado “Determinación experimental del módulo de elasticidad del bambú mediante vibración”, Ramírez *et al.*, 2023, también se informa sobre el módulo de elasticidad de esta especie de bambú. Los elementos formados por latas de bambú operan dentro de estos rangos mencionados anteriormente.

Es importante mencionar que se tiene planeado en el futuro inmediato llevar a cabo estudios en latas de bambú respecto a las configuraciones geométricas y formas de unión entre ellas.

Existen distintas formas de ensamblar una estructura de bambú. Para el Caparazón, se utilizaron cuatro tipos de uniones, que garantizaran siempre la continuidad estructural entre los elementos, lo cual previene que las fuerzas que provocan las deformaciones mecánicas se mantengan bajo control de manera segura. Los tres marcos están ensamblados por medio de la unión tradicional conocida como boca de pescado -propia de conexiones perpendiculares- y las patas de gallo por uniones con perno -reemplazando la unión tradicional de pico de flauta- mediante el uso de pernos roscados, tuercas y rondanas. La primera se utilizó en el montante perpendicular a la cuerda superior del marco y la base que descansa sobre los dados de carga. mientras que, para las patas de gallo o tensores, que absorben los esfuerzos de empuje lateral del montante con la cuerda superior, se utilizó la segunda. De igual manera, se utilizó la unión con perno para conectar las diagonales que unen los montantes de los marcos entre sí. Su presencia es una condición necesaria para asegurar la estabilidad de los marcos a fuerzas perpendiculares.

En cuanto a la cubierta del Caparazón se emplearon tres tipos de amarres con mecate de yute. La Figura 6 muestra de izquierda a derecha, el amarre de barrilete, con el cual se mantienen cohesionadas las latas de bambú que formaron



Figura 6. Tres tipos de amarres con mecate: barrilete, cuadrado y lateral.

las vigas curvas del Caparazón; al centro de la imagen, el amarre cuadrado para sujetar las vigas a la cuerda superior del marco; y, para la unión de las vigas curvas con los segmentos paralelos de bambú que forman el cuerpo de la cubierta, se utilizó un trenzado denominado amarre lateral.

El caparazón tuvo dos fases de desarrollo en su producción. En la primera se construyó y clasificaron todas las partes de la estructura y componentes de unión. Después se desmontó y almacenó para la segunda fase, que consistió en la realización de un taller de construcción, dirigido a estudiantes de arquitectura e ingeniería civil. Esto ocurrió unos meses después, dejando como resultado la instalación del Caparazón en uno de los jardines del campus universitario. Al momento de terminar la instalación del caparazón, se sellaron las oquedades de los culmos rollizos con mortero, para evitar el alojamiento de insectos como las abejas y hormigas, o de arácnidos. Es una medida necesaria, para reducir molestias en el futuro. Cabe destacar también que, la instalación del Caparazón cuenta con dados de carga que levantan la estructura 30 cm del suelo, evitando problemas de transmisión de humedad. Sin embargo, todo el sistema estructural y cubierta queda expuesto de manera directa a la intemperie. Es del dominio general, que el bambú sufre un desgaste acelerado debido la exposición solar directa y la lluvia. Por regla general una estructura de bambú debe tener un buen sombreado (techumbre con aleros largos) y buenas botas ((bambúes separado de la superficie). El Caparazón está en observación. No obstante que se han aplicado productos como Polyform® Barniz 11000, el cual se desprendió a los 10 meses; o el aceite de linaza, no se ha evitado el desgaste causado por el clima. ¿Cómo proteger al bambú en estas condiciones?, es una asignatura pendiente de investigar que se planea realizar en el mediano plazo.

Diseño y construcción de las mamparas.

El corazón de bambú que se obtuvo del corte longitudinal paralelo y se destinó para el diseño de cinco mamparas que fueron instaladas en el laboratorio de Estudios del Hábitat Sustentable, del departamento de Medio Ambiente, en la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco.

Las mamparas están formadas por un marco rectangular de madera de 4 cm de espesor, dentro del cual se insertaron, con uniones a hueso, nueve corazones de bambú en cada uno.

Para el montaje de las mamparas fue necesario diseñar una junta articulada a fuerza axial vertical. Esto con el propósito de prevenir la acción de fuerzas verticales ocasionales, por un asentamiento eventual de la losa o por sismo, que deformen o dañen la mampara. La junta articulada que se observa en la Figura 7, se compone de un marco de madera, asentado sobre el lecho bajo de la losa de concreto. En el hueco del marco se inserta el bastón de madera, con una placa de neopreno en el extremo que tendrá contacto con la losa. Existe una holgura de 1/16" entre la junta y el bastón. Los bastidores quedan sujetos a la losa por medio de bastones de madera, los cuales están fijos a cada costado del bastidor, de tal manera que un bastón sostiene a dos mamparas adosada cada una a un costado.

Cabe destacar que el juego orgánico que ofrece la geometría interna del corazón de bambú le aporta confort y funcionalidad a la ambientación del espacio interior. Agrega una atmósfera llena de transparencia sin dejar de marcar la frontera de circulación para dos secciones de trabajo. Las mamparas le dan un toque de buen gusto a la organización y ambientación espacial del laboratorio (Figura 8).



Figura 7. Junta articulada a fuerza axial vertical.

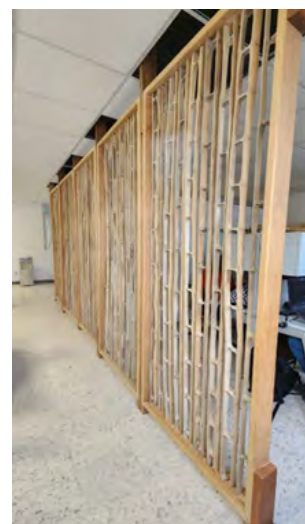


Figura 8. Mamparas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos respecto a las maneras que existen de cortar el bambú longitudinalmente resultaron exitosos. Está comprobado que es posible realizar dos cortes sobre el eje longitudinal de la vara de bambú. Uno, en dirección paralela al eje longitudinal, y otro, en forma radial sobre ese eje. En lo relativo al primero, la composición formal generada por la geometría orgánica de los corazones de bambú, le agregó funcionalidad, transparencia y buen gusto a la ambientación del espacio interior del laboratorio de Estudios del Hábitat Sustentable. Respecto a los resultados obtenidos en el segundo caso, se comprobó la factibilidad de generar formas curvas con segmentos longitudinales y su integración como viga, a partir de un paquete de latas firmemente zunchada. En este ejercicio de investigación se trabajaron con diversos tipos de conexiones que enriquecieron la solución formal: uniones tradicionales -como la boca de pescado, uniones pernadas, y los amarres con sogá.

Se pudo comprobar la factibilidad de formar a los alumnos en la fabricación y construcción de elementos constructivos y ornamentales con bambú. Los resultados propician mejores condiciones para continuar definiendo las formas y los métodos que procuren el conocimiento y aprendizaje de construcción con bambú dentro del currículo académico.

La colaboración de alumnos de servicio social en todo el proceso, así como la participación de estudiantes de arquitectura e ingeniería civil en la instalación del Caparazón refuerzan la pertinencia de incorporar experiencias prácticas para el aprendizaje y comprensión constructiva de este material. También, afianzan la necesidad de formación profesional de ambas especialidades en el uso de materiales renovables, sustentables como el bambú. La brecha de emisiones de CO₂ para evitar el incremento en la temperatura por encima del 1.5°C y debajo de los 2°C hacia el 2100, demanda a las profesiones del diseño y construcción incorporar en su quehacer profesional materiales con baja o nula dependencia en el uso de combustibles fósiles. El bambú no emite CO₂, y en cambio, lo absorbe.

Agradecimientos y financiamiento: Nuestro agradecimiento al grupo de alumnos de servicio social que colaboraron en la manufactura, en particular a Fernanda O.M. Moreno Luna por la generación de las tablas de este artículo. A la División de Ciencias Básicas e Ingeniería y a la División de Ciencias y Artes para el Diseño, de la Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco, por el financiamiento al proyecto de investigación N-500 “Ensamblajes y conexiones de módulos estructurales de bambú”

Bibliografía

- Aguirre-Cadena, J. F., Ramírez-Valverde, B., Cadena-Iñiguez, J., Juárez-Sánchez, J. P., Caso-Barrera, L., & Martínez-Carrera, D. (2018). Biomasa y carbono en *Guadua angustifolia* y *Bambusa oldhamii* en dos comunidades de la sierra Nororiental de Puebla, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1701–1708. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442018000401701
- Botero-Cortes, L. F. (2004). *Manual de industrialización del bambú*. COMPYMEFOR. Argentina. <https://drive.google.com/file/d/1OPK4argaQtrneB-6v4EldmbGVlOMGqCk/view>
- Camargo, J. C., Rodríguez, J. A., & Arango, A. M. (2010). Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetalera de Colombia. *Revista de Recursos Naturales y Ambiente*, 61, 86–94. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/5987>
- Caori, P., & Takeuchi, T. (2004). Comportamiento estructural de la *Guadua angustifolia*. Uniones en guadua. *Ingeniería e Investigación*, 24(2), 3–7. Universidad Nacional de Colombia.
- Cely-Moreno, L. A., Hernández-Rojas, W. G., & Gutiérrez-Junco, O. J. (2012). Caracterización de la *Guadua angustifolia* Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10. *Facultad de Ingeniería*, 21(33), 53–71.
- Comisión Nacional Forestal. (2002). *Manual para la construcción sustentable con bambú*. México. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/manual_para_la_construccion_sustentable_con_bambu.pdf
- Cortés Rodríguez, G. R. (2000). Los bambúes nativos de México. *CONABIO. Biodiversitas*, 30, 12–15.
- Cruz-Armendáriz, N. M., Ruiz-Sánchez, E., & Reyes-Aguero, J. A. (2023). Servicios ecosistémicos de las especies nativas e introducidas de bambú en la Huasteca Potosina, México: usos del bambú. *Acta Botánica Mexicana*, 130, e2132. <https://doi.org/10.21829/abm130.2023.2132>
- Cuenca, A., León-Merino, A., Sangerman-Jarquín, D., Hernández-Juarez, M., & Zamora-Martínez, M. (2020). Aspectos socioeconómicos del aprovechamiento del bambú en una comunidad rural de Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.815>
- Estrada Martín. (2010). *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*. National University of Colombia.
- Guerrero, J. J., Quiroz, A., & Terán, A. (2014, 12–15 de noviembre). Propiedades mecánicas del bambú. [Sesión de Congreso]. *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Puerto Vallarta, Jalisco.
- Hidalgo, O. (2003). *Bamboo: The gift of gods*. Editorial The Author, Bogotá, Colombia. ISBN 958334298X.
- International Standard. (2019). *Bamboo — Determination of physical and mechanical properties*. ISO 221571-2004.
- Kelchner, S. A., & Bamboo Phylogeny Group. (2013). Higher level phylogenetic relationships within the bamboos (Poaceae: Bambusoideae) based on five plastid markers. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 67, 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2013.02.005>

- Lucila Aguilar Arquitectos. (2020). *Catálogo de Bambú en México*. <https://lucilaaguilar.com/wp-content/uploads/2021/05/Cata%CC%81logo-de-Bambu%CC%81-en-Me%CC%81xico-Lucila-Aguilar-2020.pdf>
- Moreno-Martínez, J. L., Ruiz-Bello, C., Espinosa-Zaragoza, S., & Macian-Núñez de Castro, J. M. (2018). El otate (*Otatea acuminata*) y la palma real (*Sabal mexicana*): Recursos ancestrales usados en la construcción de vivienda rural. *Agro Productividad*, 5(4), 26–36. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/410>
- Obataya, E., Kitin, P., & Yamauchi, H. (2007). Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber–foam composite structure. *Wood Science and Technology*, 41, 385–400. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0127-8>
- Ordóñez-Candelaria, V. R., & Bárcenas Pazos, G. M. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas (*Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia* y *Guadua velutina*). *Madera y Bosques*, 20(2), 111–125.
- Ramírez, M., Almaráz, A., Guerrero, J., & Rivas, A. (2024, 13–16 de noviembre). Determinación experimental del módulo de elasticidad del bambú mediante vibración. [Sesión de Congreso]. *XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Cancún, Quintana Roo.
- Ruiz-Sánchez, E., Clark, L. G., Londoño, X., Mejía-Saulés, M. T., & Cortés Rodríguez, G. (2015). Morphological keys to the genera and species of bamboos (Poaceae: Bambusoideae) of Mexico. *Phytotaxa*, 236, 1–24. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.236.1.1>
- Ruiz-Sánchez, E. (2019). *Los bambúes de México*. https://www.researchgate.net/publication/335989474_LOS_BAMBUES_DE_MEXICO
- Ruiz-Sánchez, E., García-Martínez, M. A., & Heredia-Espinoza, V. Y. (2023). Bambúes nativos en la construcción de viviendas rurales: Bajareque en el México prehispánico y siglo XX. *Botanical Sciences*, 101(4), 1088–1101. <https://doi.org/10.17129/botsci.3330>
- Takeuchi, T., Caori, P., & González, C. E. (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería y Universidad*, 11(1), 89–103.
- United Nations Environment Programme. (2024a). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>
- United Nations Environment Programme. (2024b). *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46404>

Extracción y actividad óptica de pigmentos obtenidos a partir de residuos de fresa para su uso como Sensibilizantes Naturales en celdas solares tipo DSSC

María Cristina Castañón-Bautista ^{1,*}, Susana Navarro-García ¹, América Xiomara Jiménez-Pérez ², Rodrigo Vivar-Ocampo ¹, Alicia Ravelo-García ¹, José Francisco Armendáriz-López ¹

¹ Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, UABC, Tijuana, Baja California, México

² Despacho Arquitectónico, La Paz, Baja California, México.

* Autor de correspondencia: cristinacastanon@uabc.edu.mx; Tel.: 664 979 75 91

Energías Renovables (Energía Solar)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 7 de agosto de 2025

Publicado: 8 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.486>

Resumen: Ante la creciente demanda energética global y los desafíos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles, las celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC) surgen como una alternativa sustentable. Este trabajo evalúa el potencial de pigmentos naturales obtenidos de residuos agroindustriales de fresa como sensibilizadores en celdas DSSC, comparándolos con extractos de arándano, debido a su contenido común de antocianinas. Se empleó un proceso de deshidratación, maceración y extracción con metanol, seguido de análisis UV-Vis para caracterizar la eficiencia de absorción de luz del extracto. Los resultados mostraron que el metanol es un solvente más eficiente que el ácido cítrico en la extracción de antocianinas, evidenciado por una mayor intensidad de color. Aunque los resultados específicos del desempeño fotovoltaico están en proceso, el análisis espectrofotométrico sugiere que los residuos de fresa tienen un buen potencial como fuente de colorantes para DSSC, mostrando una absorción significativa en el rango de 350 a 430 nm (4a y 4b), que coincide con las longitudes de onda efectivas para la excitación de colorantes en celdas solares DSSC. Este estudio busca proponer futuras investigaciones orientadas a mejorar la estabilidad del colorante, evaluar su eficiencia en condiciones reales y explorar otros residuos de frutas. Se concluye que los residuos de fresa representan una alternativa viable y sustentable frente al arándano, lo cual promueve la economía circular y el aprovechamiento de biomasa en el sector energético.

Palabras clave: celdas solares DSSC, antocianinas, pigmentos naturales, residuos agroindustriales, energía renovable

Extraction and optical activity of pigments obtained from strawberry waste for use as Natural Sensitizers in solar cells DSSC

Abstract: In response to the growing global energy demand and the environmental challenges posed by fossil fuels, dye-sensitized solar cells (DSSCs) are emerging as a sustainable alternative. This study assesses the potential of natural pigments extracted from strawberry agro-industrial waste as sensitizers in DSSCs, compared to blueberry extracts, due to their shared anthocyanin content. A process involving dehydration, maceration, and methanol-based extraction was used, followed by UV-Vis analysis to evaluate light absorption efficiency. Results indicated that methanol was a more effective solvent than citric acid for anthocyanin extraction, as evidenced by stronger color intensity. Although specific photovoltaic performance results are in progress, spectrophotometric analysis suggests that strawberry waste has good potential as a source of dyes for DSSCs, showing significant absorption in the range of 350 to 430 nm (4a and 4b), which coincides with the effective wavelengths for dye excitation in DSSC solar cells. Future research is proposed to enhance pigment stability, test real-world efficiency, and explore other fruit-based waste. The study concludes that strawberry waste presents a viable and sustainable alternative to blueberries, promoting circular economy and biomass utilization in the energy sector.

Keywords: DSSC solar cells, anthocyanins, natural pigments, agro-industrial waste, renewable energy

Introducción

El crecimiento acelerado de la población mundial demanda un uso y consumo de energía, que en la actualidad ha sido cubierta principalmente por combustibles fósiles, sin embargo, su impacto negativo al medio ambiente muestra que no se debe depender de esta fuente de energía y para mitigar estos efectos adversos es pertinente diversificar a través de energías renovables como la eólica, la biomasa, hidráulica y la fotovoltaica por mencionar algunas. Como respuesta a este desafío, el uso de la energía solar se destaca por su abundancia, accesibilidad y bajo impacto ambiental (Kalair, 2020). Sin embargo, las tecnologías fotovoltaicas convencionales, basadas principalmente en silicio, presentan

desventajas significativas, como altos costos de fabricación y la alta pureza de su materia prima (Pooja Prakash y B. Janarthanasu, 2023).

Ante estas limitaciones, han surgido nuevas propuestas tecnológicas, como las celdas solares sensibilizadas con pigmentos (DSSC), cuyos inicios en 1991 hacen referencia a Michael Grätzel y Brian O'Regan (Harrison *et al.*, 2024). En las celdas solares DSSC pueden emplearse colorantes obtenidos de forma sintética o de origen natural y como sensibilizadores que, al absorber la luz solar, liberan electrones hacia un material semiconductor, generando corriente eléctrica, por lo que la elección del pigmento es un componente esencial de las celdas solares DSSC (Barraza-Jiménez, 2024), así como tener una banda de absorción entre los 400 a 600 nm (Harrison *et al.*, 2024).

Los pigmentos de origen natural pueden obtenerse de plantas, animales, microorganismos y fuentes minerales (Alegbe y Uthman, 2024), en su selección deben considerarse características como la capacidad de absorbancia en el espectro visible e infrarrojo, de unirse al semiconductor a través del anclaje con grupos hidroxilo, la transferencia de electrones (Mohamed *et al.*, 2021), la capacidad de regeneración (Pooja Prakash y B. Janarthanasu, 2023), su eficiencia y vida útil. De acuerdo con Shennan *et al.* (2025) los colorantes obtenidos de plantas presentan un rango de absorción en el espectro visible entre los 400 y 700 nm y pueden estar presentes pigmentos como carotenoides, taninos, betalainas, clorofila y flavonoides (Srivastava P. *et al.*, 2024), estos últimos se clasifican principalmente en flavanonas, flavonas, isoflavonas, flavonoles, catequinas y antocianinas (Lyu *et al.*, 2022).

En el caso de las antocianinas, son compuestos polares y solubles en agua (Glennise *et al.*, 2022) y están presentes en bayas, algunas flores, en raíces y corteza de los árboles donde han mostrado propiedades como sensibilizantes (Samina Qmar y Sule Erten Ela, 2024), pertenecen al grupo de los compuestos fenólicos y son los que les dan el color rojo, morado y azul (Brera *et al.*, 2023) a las plantas y algunos autores refieren que el color dependerá del pH (P.H. S. Miranda *et al.*, 2021). Asimismo, tienen la capacidad de absorber la radiación solar en la región UV-Visible (Korir B. *et al.*, 2024). Ejemplo de ello son los pigmentos obtenidos a partir de fresa (*Fragaria sp*) y arándano (*Vaccinium myrtillus*) (Gomes *et al.* 2022, Ghann *et al.* 2017). Al respecto, Senthil *et al.* (2014) reportan que los espectros de absorbancia UV-Vis para extractos de fresa están entre los 420 nm y en el caso del arándano (Cerdeira *et al.* 2023) las bandas de absorción entre los 520 y 565 nm.

Para la extracción de los colorantes, Ujjwal *et al.* (2024) señalan que pueden utilizarse diversos métodos como la Extracción Soxhlet (ES), Extracción Asistida por Ultrasonido (EAU), Extracción con Fluidos Supercríticos (EFS), Extracción Asistida por Microondas (EAM), Extracción Asistida por Enzimas (EAE), destilación al vapor, prensado, extracción sólido-líquido y maceración/infusión. En este último método, la muestra se macera en un durante un tiempo prolongado utilizando disolventes, los mas comunes son el agua y los disolventes orgánicos como el metanol y etanol (P.H. S. Miranda *et al.*, 2021).

Noguerio *et al.* (2024) refieren que en 2022 la producción mundial de fresas fue de 9.6 millones de toneladas y México se encuentra entre los principales productores. El estado de Baja California es una región con producción y procesamiento de este fruto (SAGARPA, 2022) y, por tanto, hay una generación de residuos orgánicos (biomasa) procedente de este sector agroindustrial en la región. La valorización de subproductos de la industria agroalimentaria es uno de los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas para el 2030, debido a la generación de grandes cantidades de residuos orgánicos, reportando más del 50% de la fruta fresca (Noguerio *et al.* 2024).

El propósito de este trabajo es obtener un pigmento de fresa deshidratada, utilizando un deshidratador solar directo y la técnica de maceración utilizando dos disolventes y la medición de su actividad óptica mediante un espectrofotómetro UV-Vis. Los resultados obtenidos se compararán con datos de referencia extraídos de arándano, dado que ambos frutos comparten la misma molécula activa y son productos agrícolas que se producen en la región. Esta comparación busca identificar cuál de los dos residuos vegetales puede considerarse viable como un pigmento para el uso posterior en celdas solares DSSC en términos de eficiencia energética, sostenibilidad y viabilidad de implementación. Los resultados obtenidos permitirán determinar si los residuos de fresa representan una alternativa competitiva frente a los datos de referencia de arándano y promover así el aprovechamiento de biomasa y la reducción del impacto ambiental de la industria agroalimentaria de la zona.

Materiales y Métodos

Maceración

Se seleccionaron 10 fresas (*Fragaria sp.*) frescas con un peso total de 171.29 g obtenido en la balanza analítica (CGOLDENWALL). Se cortaron en láminas delgadas y se colocaron en una charola para ser deshidratadas durante 6 horas a una temperatura constante de 50 °C en un deshidratador solar directo. Como resultado, se obtuvieron 8.42 g de fresa deshidratada que se molieron en un mortero hasta obtener un polvo fino (Figura 1).

Selección de disolvente

Del polvo obtenido, y como se muestra en la Figura 1, se tomaron dos muestras: 3.16 g se depositaron en un frasco de vidrio con tapa (número 7) y 5.33 g en otro frasco similar (número 8). A la muestra contenida en el frasco 7 se le añadieron 20 ml de metanol (disolvente polar soluble en agua), mientras que a la del frasco 8 se le incorporaron 30 ml de una solución de ácido cítrico (ácido orgánico soluble en agua). Ambos frascos se dejaron reposar durante cinco días a temperatura ambiente, protegidos de la luz, con el fin de favorecer la extracción de los pigmentos.



Figura 1. Maceración de muestra de fresa deshidratada

Después del periodo de reposo, se observó una mayor intensidad de color en el extracto obtenido con metanol en comparación con el ácido cítrico. La mezcla se filtró utilizando papel filtro Whatman de 90 mm y se expuso a la luz de una lámpara ultravioleta de 395nm de longitud de onda (Figura 2), observándose como resultado, un cambio en la tonalidad de rojo a verde.

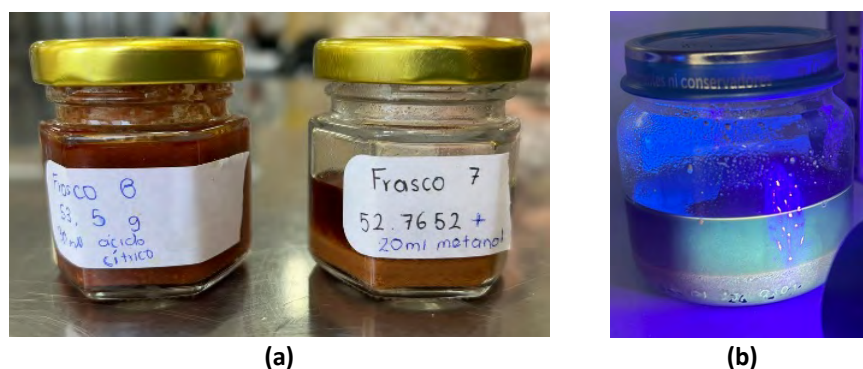


Figura 2. (a) Muestras con disolvente, (b) resultados de prueba con luz ultravioleta

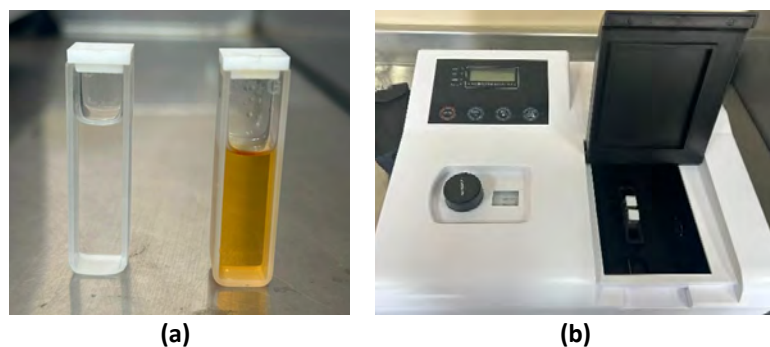


Figura 3. (a) Probetas con muestra de fresa con disolvente y (b) medición en espectrofotómetro

Prueba UV-Vis

El extracto obtenido fue analizado utilizando un espectrofotómetro UV-Vis modelo 721. Para la medición, se emplearon dos probetas: una con metanol como blanco y otra con la mezcla de metanol y extracto (Figura 3a). Ambas fueron llenadas con la ayuda de una micropipeta marca ANGGREK (rango de 100 a 1000 μ L) y posteriormente introducidas en el espectrofotómetro para realizar la lectura correspondiente (Figura 3b).

Resultados y Discusión

El proceso de extracción de pigmentos a partir de residuos de fresa permitió obtener una muestra rica en antocianinas, donde se observó mayor intensidad de color al utilizar metanol como disolvente en comparación con el ácido cítrico. Por una parte, se observa que en el proceso de deshidratación se pierde alrededor del 95% en peso, correspondiente al agua retirada por evaporación, lo que supone un gasto energético importante, este gasto se evitó utilizando un deshidratador solar. La exposición a luz ultravioleta generó una tonalidad verde característica, indicando la presencia de compuestos fotoactivos, asimismo al estar dentro del espectro visible, la luz emitida se puede aprovechar en celdas fotovoltaicas. La espectrofotometría UV-Vis reveló un pico de absorción máximo aproximadamente a 430 nm (Figura 4), similar al reportado (Senthil *et al.*, 2014) y con las longitudes de onda efectivas para la excitación de colorantes en celdas solares DSSC (Harrison *et al.*, 2024).

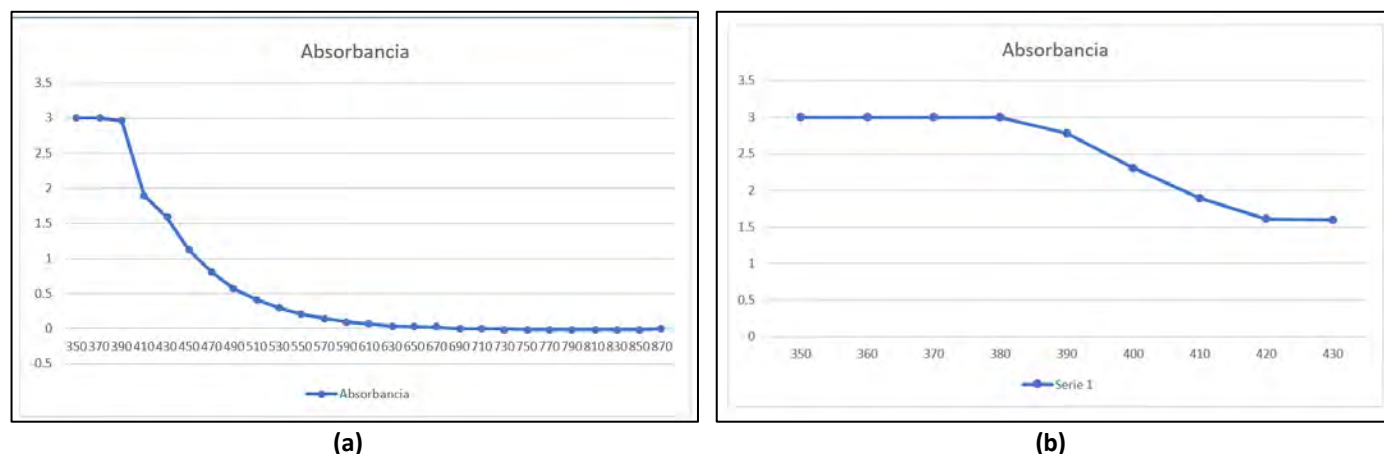


Figura 4. Curvas de absorbancia en: (a) Intervalo de 350-870 nm, (b) intervalo de 350-430nm

Conclusiones

Este estudio demuestra el potencial de los residuos agroindustriales de fresa como fuente viable de pigmentos naturales para su uso en celdas solares sensibilizadas por colorantes (DSSC) en diferentes etapas e integrando diferentes tecnologías sustentables. En la etapa de extracción se destaca el uso de ecotecnologías como el evaporador solar que reduce el costo energético y consecuentemente la huella de carbono. La extracción mediante metanol resultó más eficiente que el ácido cítrico para obtener antocianinas, lo cual se confirmó por la intensidad del color y el comportamiento en el análisis UV-Vis. Esto muestra una mayor eficiencia en la extracción del colorante con solventes de carácter no polar, en este caso el metanol es un solvente que se obtiene principalmente de un proceso industrial; mientras que la extracción utilizando ácido cítrico muestra que ésta se puede realizar con un solvente no polar de origen vegetal. Lo que sugiere que una mezcla de solventes podría optimizar la extracción, a la vez que el uso de un solvente obtenido de manera natural como lo es el ácido cítrico reduce la dependencia de solventes industriales. Los colorantes obtenidos son fotoactivos y su desempeño óptico respalda la hipótesis de que a partir de residuos pueden obtenerse sensibilizadores efectivos, debido a que su actividad se encuentra en el intervalo de luz visible aprovechable en celdas fotovoltaicas.

La comparación con extractos de arándano, utilizados como referencia, sugiere que los residuos de fresa representan una alternativa sustentable, económica y localmente accesible, con beneficios adicionales en términos de reducción de desechos y aprovechamiento de biomasa. Estos hallazgos refuerzan la importancia de explorar fuentes de origen natural no convencionales en la fabricación de dispositivos para la generación de energía a partir del sol, mediante las celdas solares DSSC, sumando a la transición hacia tecnologías energéticas más limpias y asequibles.

En conclusión, el uso de pigmentos naturales derivados de residuos agroindustriales no solo es técnicamente prometedor, sino también ambientalmente favorable, abriendo nuevas oportunidades para el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles desde una perspectiva de economía circular.

Agradecimientos y financiamiento: Agradecemos al Cuerpo Académico de Ingeniería y Tecnología en Energías Renovables de la UABC y la oportunidad de presentar estos resultados preliminares que forman parte del Proyecto “Evaluación de Sensibilizantes Orgánicos para la Producción de Celdas Fotovoltaicas a partir de residuos de la Industria Agroalimentaria de Baja California.

Bibliografía

- Alegbe, E. O., & Olatunde, U. T. (2024). A review of history, properties, classification, applications and challenges of natural and synthetic dyes. *Heliyon*, 10, e33646. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33646>
- Anaya González, G. S., & Rodríguez Romero, J. (2024). Tres generaciones de celdas solares: Alternativas para un mundo más sustentable. *Tendencias en Energías Renovables (TERYS)*, 3(1), 65–69. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.195>
- Barraza-Jiménez, D., Manuel Lerma Mancinas, D., Iván Flores-Hidalgo, H., Armando Olvera Corral, R., Iliana Torres-Herrera, S., & Alberto Flores-Hidalgo, M. (2024). Perspectives of organic dyes cosensitization and its utilization in TiO₂ nanoclusters for photocatalysis applications. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.113395>
- Ghann, W., Kang, H., Jeque, T., Yadav, S., Chavez-Gil, T., Nesbitt, F., & Uddin, J. (2017). Fabrication, optimization and characterization of natural dye sensitized solar cell. *Scientific Reports*, 7, 41470. <https://doi.org/10.1038/srep41470>
- Gomes, A. R., Costa, L. A. T., Silva, M. P. A., Tomé, N. S. R., Cestarolli, D. T., & Guerra, E. M. (2022). Preliminary investigation on application of VO₂, polyaniline, and ethanolic extracts of different fruits as components for DSSCs. *International Journal of Electrochemical Science*, 12, 1–12. <https://doi.org/10.20964/2022.12.56>
- Harrison, O. E., Lethole, N. L., & Mukumba, P. (2024). Luminescent materials for dye-sensitized solar cells: Advances and directions review. *Applied Sciences*, 14, 9202. <https://doi.org/10.3390/app14209202>
- Kalair, A., Abas, N., Saleem, M. S., Raza Kalair, A., & Khan, N. (2020). Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. <https://doi.org/10.1002/est2.135>
- Korir, B. K., Kibet, S. K., & Ngari, M. P. A. (2024). A review on the current status of dye-sensitized solar cells: Toward sustainable energy. *Energy Science & Engineering*, 12(8), 3188–3226. <https://doi.org/10.1002/ese3.1815>
- Lyu, X., Lyu, Y., Yu, H., Chen, W., Ye, L., & Yang, R. (2022). Biotechnological advances for improving natural pigment production: A state-of-art review. *Bioresources and Bioprocessing*, 9, 8. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00497-4>
- Mejica, G. F. C., Unpaprom, Y., Balakrishnan, D., Dussadee, N., Buochareon, S., & Ramaraj, R. (2022). Anthocyanin pigment-based dye-sensitized solar cells with improved pH-dependent photovoltaic properties. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101971. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101971>
- Miranda, P. H. S., Martins, G. A., Carvalho dos Santos, A., Bastos de Freitas, B. C., de Barros-Vilas Boas, E. V., & Damiani, C. (2021). A scientific approach to extraction methods and stability of pigments from Amazonian fruits. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.047>
- Mohamed, Y., Bouziani, A., Ocak, C., Seferoğlu, Z., & Sillanpää, M. (2021). Organic/metal-organic photosensitizers for dye-sensitized solar cells (DSSC): Recent developments, new trends, and future perceptions. *Dyes and Pigments*, 192, 109227. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2021.109227>
- Montagni, T., Rodríguez Chialanza, M., & Cerda, M. F. (2023). Blueberries as a source of energy: Physical chemistry characterization of their anthocyanins as dye-sensitized solar cells' sensitizers. *Solar*, 3, 283–297. <https://doi.org/10.3390/solar3020017>
- Nabi, B. G., Mukhtar, K., Ahmed, W., Manzoor, M. F., Nawaz Ranjha, M. M. A., Kieliszek, M., Bhat, Z. F., & Aadil, R. M. (2023). Natural pigments: Anthocyanins, carotenoids, chlorophylls, and betalains as colorants in food products. *Food Bioscience*, 52, 102403. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102403>
- Nogueiro Estevinho, B., & Bastos, Y. R. F. (2024). Microencapsulation of extracts of strawberry (*Fragaria vesca*) by-products by spray-drying using individual and binary/ternary blends of biopolymers. *Molecules*, 29, 4528. <https://doi.org/10.3390/molecules29194528>
- Pooja, P., & Janarthanan, B. (2023). Review on the progress of light harvesting natural pigments as DSSC sensitizers with high potency. *Inorganic Chemistry Communications*, 152, 110638. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110638>
- Qmar, S., & Erten Ela, S. (2024). Dye-sensitized solar cells (DSSC): Principles, materials and working mechanism. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 74, 101871. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2024.101871>
- Sanchez, O. L. (2020). Fabricación y caracterización de celdas solares de TiO₂ sensibilizadas con colorantes orgánicos obtenidos de *Dactylopius coccus* Costa (grana cochinilla) y Jamaica. *Instituto de Ciencias, Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores, BUAP*. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/fb39b5ae-2bf0-4643-a4c7-0ba1033d053c/content>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2022). Encabeza cultivo de fresa, las siembras en la zona costa de Baja California. <https://www.gob.mx/agricultura/bajacalifornia/es/articulos/encabeza-cultivo-de-fresa-las-siembras-en-la-zona-costa-de-baja-california?idiom=e>
- Senthil, T. S., Muthukumarasamy, N., & Kang, M. (2014). Zn nanorods based dye sensitized solar cells sensitized using natural dyes extracted from beetroot, rose and strawberry. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 35(4), 1050–1056. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2014.35.4.1050>
- Shengnan, L., Xiaocai, H., Qingxin, X., Yi'na, L., & De, F. (2025). Research progress on dyes for n-type dye-sensitized solar cells. *Materials Science and Engineering B*, 314, 118052. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2025.118052>
- Srivastava, P., Tiwari, A., Sharma, S., & Srivastav, N. (2024). Comparative study of natural dyes extracted from dark red and yellow *Frangipani* flowers (*Plumeria rubra* L.) as DSSC sensitizer. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 317, 172055. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2024.172055>
- Ujjwal, M., Prajapat, K., Dhonde, M., Sahu, K., & Shirage, P. M. (2024). Natural dyes for dye-sensitized solar cells (DSSCs): An overview of extraction, characterization and performance. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 37, 101111. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101111>

Sistema de Automatización residencial basado en el uso de Energías Renovables

Raúl Castillo-Meraz ^{1,*}, Carmen del Pilar Suárez-Rodríguez ², Yoshio Josafat Del Ángel-Rubio ², Fátima María Isabel De los Santos-García ³

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luís Potosí, San Luís Potosí, San Luís Potosí, México

² Coordinación Académica Región Huasteca Sur, Universidad Autónoma de San Luís Potosí, San Luís Potosí, San Luís Potosí, México

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luís Potosí, San Luís Potosí, San Luís Potosí, México

* Autor de correspondencia: raul.castillo@uaslp.mx

Energías Renovables (Energía Solar)

Recibido: 2 de abril de 2025 Aceptado: 3 de junio de 2025 Publicado: 9 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.415>

Resumen: La Automatización Residencial (Domótica) se define como el conjunto de tecnologías aplicadas al control y la automatización inteligente de la vivienda, que permite una gestión eficiente del uso de la energía, que aporta seguridad y confort, además de comunicación entre el usuario y el sistema. En este proyecto se propone la utilización de energías renovables dirigidas a la automatización residencial en cuatro aspectos básicos: (1) Sistema de iluminación interior y exterior, (2) Sistema de riego de jardín, (3) Sistema de seguridad residencial y (4) Sistema de control de temperatura interior. Estos sistemas se implementan en un modelo basado en una vivienda típica de interés social y dependerán de alimentación eléctrica basada en energía de tipo solar fotovoltaica con sus respectivas adaptaciones para los diferentes niveles de voltaje requeridos, así como un sistema de respaldo de energía para que el sistema funcione aún en condiciones de oscuridad o poca irradiancia. Por último, se realizó un análisis costo-beneficio del sistema completo y de su consumo eléctrico.

Palabras clave: Domótica, Energía Solar Fotovoltaica, Panel Solar, Arduino, Batería

Residential Automation System based on the Use of Renewable Energy

Abstract: Residential Automation (Home Automation) is defined as the set of technologies applied to the intelligent control and automation of a home, enabling efficient energy management, enhanced security and comfort, as well as communication between the user and the system. This project proposes the use of renewable energy sources directed toward residential automation in four basic areas: (1) interior and exterior lighting systems, (2) garden irrigation system, (3) residential security system, and (4) indoor temperature control system. These systems are implemented in a model based on a typical low-income housing unit and rely on an electrical supply derived from photovoltaic solar energy, with appropriate adaptations for the different required voltage levels, as well as a backup energy system to ensure operation even under low light or low irradiance conditions. Finally, a cost-benefit analysis of the complete system and its electrical consumption was carried out.

Keywords: Home Automation, Photovoltaic Solar Energy, Solar Panel, Arduino, Battery

Introducción

Los orígenes de la Domótica son relativamente recientes: uno de sus antecedentes principales refiere a la década de los 70's, donde un grupo de investigadores británicos realizó trabajos sobre un protocolo de comunicación entre diversos dispositivos al que llamaron X10 (Romero, 2010). Esto nace como una consecuencia natural de lo que en ese entonces se estaba gestando en otro ámbito de la vida moderna: la Automatización Industrial. Es precisamente ahí donde nace la Domótica: el hecho de necesitar que las tareas habituales de una vivienda sean realizadas de manera automática, sin intervención humana.

La Domótica es la evolución de la clásica automatización industrial adecuándola a las necesidades de viviendas, negocios u oficinas. Los sistemas domóticos recogen información gracias a diferentes sensores y tras su procesado son capaces de enviar órdenes de control a diferentes dispositivos situados en la instalación llamados actuadores. Estos actuadores pueden ser persianas, enchufes, iluminación, calefacción, válvulas y un sin fin de posibilidades (Harke, 2010).

Esta tecnología responde a las nuevas necesidades que se gestan en este nuevo siglo como lo es el uso eficiente del tiempo. Al vivir en un mundo de rápidos cambios, pareciera como si el tiempo transcurriera más de prisa y cada vez las ocupaciones cotidianas absorben un mayor porcentaje de nuestro día, a tal grado que la cantidad de tiempo que se dedica a las tareas habituales del hogar es cada vez menor. Asimismo, además del uso eficiente del tiempo, la Domótica

nos facilita nuestra forma de vida, reduce nuestros consumos y hace más humanos y adaptables espacios de convivencia y trabajo. La palabra que mejor define esta tecnología es flexibilidad.

Actualmente, la Domótica no ha tenido el impacto social que se hubiera pensado teniendo en cuenta los beneficios que conlleva. Este hecho se debe a varios factores:

- **Desconocimiento.** Los potenciales usuarios de esta tecnología tienen una falta de conocimiento sobre la misma dada su poca difusión actual. Este hecho hace que exista una muy escasa demanda en el mercado e incluso hace pensar que las tecnologías domóticas solo están al alcance de unos pocos; asimismo se asocia esta tecnología con sistemas caros, elitistas, con una compleja puesta a punto sin por ello reportar grandes beneficios que justifiquen esta inversión.
- **Falta de interés por parte de grandes empresas.** Al no existir prácticamente empresas de gran envergadura que se dediquen a este ramo tecnológico, se puede decir que no hay motores que impulsen la difusión y desarrollo de este campo. Sin embargo, existen empresas de pequeña y mediana escala que apuestan por estas tecnologías pero la escasez de recursos tanto de personal como económicos hacen que compañías con este perfil no puedan considerarse como re-presentantes o motores de una industria como ésta.
- **Indiferencia.** Esto se refiere a que las empresas del ramo constructor e inmobiliario no se ven interesados en este tipo de tecnologías dado que representa una mayor inversión y sus ganancias económicas se verían reducidas; esto último sin tomar en cuenta el grandísimo valor agregado que podrían aportar las tecnologías domóticas a la vivienda

En contraparte, a continuación, se mencionan algunos de los beneficios de las tecnologías domóticas son:

- **Fomenta la accesibilidad:** el manejo de elementos dentro de una vivienda se ve facilitado y esta característica junto con las opciones de asistencia remota convierten a la domótica en un buen aliado de las personas con problemas de accesibilidad.
- **Eleva el confort de los usuarios que la emplean.** La Domótica permite interactuar de forma cómoda con persianas, toldos, interruptores, electrodomésticos, bombas de riego etcétera.
- **Fomenta el ahorro energético:** gestión de la iluminación, climatización, agua caliente sanitaria, el riego, los electrodomésticos, etc. La nueva reforma energética hace que seleccionar las mejores tarifas horarias repercuta en un gran ahorro y gracias a la domótica, el proceso de reducir la factura energética se realiza de forma casi automática. Una parte importante de la gestión energética de la domótica es la monitorización de consumos que obtiene suficientes datos como para modificar prácticas en busca de una mayor eficiencia.

Un sistema Domótico básico consta de tres partes fundamentales (Figura 1):

- **Sistema de sensores.** Con el objetivo detectar las variables de interés para los sistemas que se desean automatizar se debe contar con un conjunto de sensores con su correspondiente acondicionamiento electrónico.
- **Unidad central de proceso y control.** Las señales del sistema de sensores serán dirigidas a la unidad central de proceso y control la cual será la encargada de monitorear las variables de control, procesar dichas señales y enviar órdenes de control al sistema de actuadores.
- **Sistema de actuadores.** Es el conjunto de elementos electromecánicos que activarán los dispositivos encargados de regular las variables de interés: temperatura, humedad, luminosidad y seguridad.

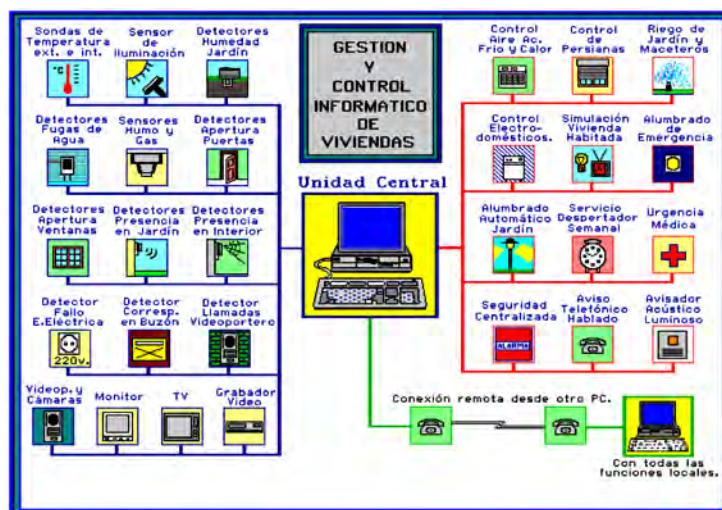


Figura 1. Esquema básico donde se muestran las partes básicas para automatización residencial.

Energía Solar Fotovoltaica

Por otro lado, la Energía Solar Fotovoltaica (FV) funciona bajo el principio físico del efecto fotoeléctrico el cual, al hacer incidir luz visible en un material semiconductor (Messenger, 2010), se genera una absorción de fotones y desplazamiento de electrones en dicho material. Esto da lugar a la generación de un potencial eléctrico en los extremos de dicho material (Figura 2).

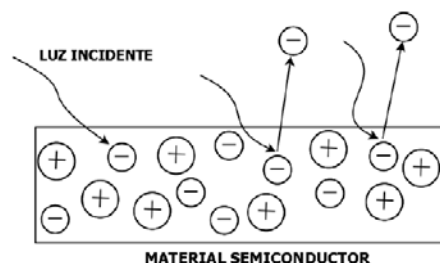


Figura 2. Imagen ilustrativa del efecto fotoeléctrico.

Las celdas solares funcionan bajo dicho efecto físico y transforman la LUZ SOLAR en ELECTRICIDAD de tipo CD (CORRIENTE DIRECTA) como se muestra en la Figura 3.

Cada panel solar está construido a partir de pequeñas celdas (obleas de silicio) que generan un potencial eléctrico individual aproximado de entre 0.6 y 0.7 Volts. Al colocar las celdas solares en arreglos serie y paralelo, se pueden obtener mayores voltajes y corrientes. El voltaje y la corriente producidos por un panel solar son directamente proporcionales al área de captación y a la irradiancia incidente.

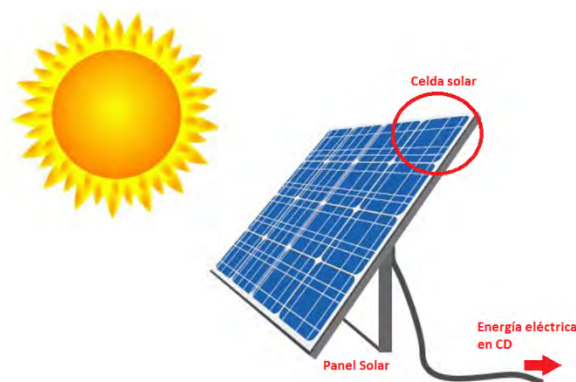


Figura 3. Celda solar y panel solar

Básicamente, un panel solar se comporta como una fuente de corriente dependiente de la irradiancia solar. A mayor irradiancia, mayor corriente eléctrica; por otro lado, las nubes y el efecto sombra, son fenómenos poco deseados en un panel solar dado que este suministrará poca corriente.

En lo que respecta al voltaje que suministra el panel solar, este se ve poco afectado por los efectos mencionados anteriormente. Sin embargo, al estar expuesto todo el día a una irradiancia intensa, el panel solar eleva su temperatura y esto si puede afectar notablemente al desempeño en voltaje. Ambos efectos, tanto de Temperatura como de Irradiancia pueden apreciarse en la Figura 4.

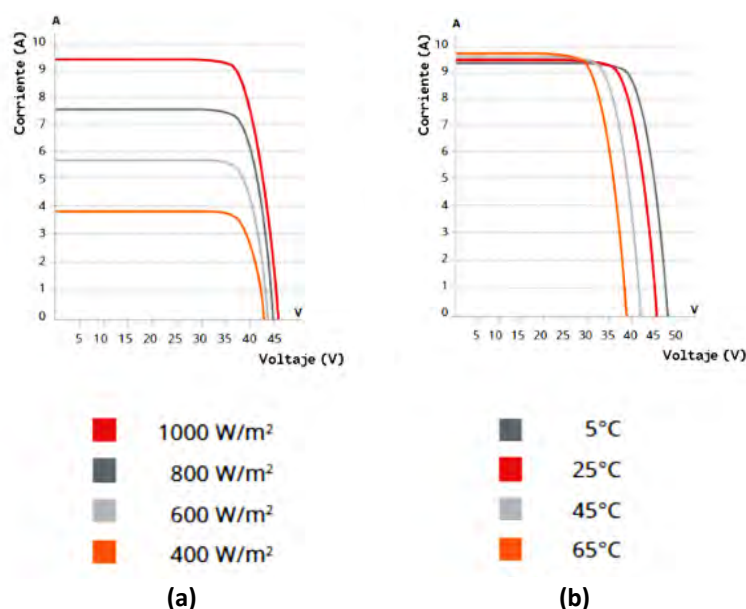


Figura 4. a) Comportamiento de un panel solar típico respecto a Irradiancia, b) Comportamiento de un panel solar típico respecto a Temperatura

Sin embargo, la teoría de Circuitos Eléctricos nos indica que la potencia eléctrica de cualquier elemento está dada por el producto del voltaje por la corriente como se ilustra en la ecuación 1 (Boylestad, 2009).

$$P = VI \quad (1)$$

Donde: P = Potencia Eléctrica (Watts); V = Voltaje (Volts); I = Corriente (Amperes)

Por lo tanto, si disminuye el voltaje o la corriente por algún efecto no deseado (sombra, nublado, temperatura elevada) la potencia que suministra el panel se ve notablemente afectada al ser el producto del voltaje multiplicado por la corriente.

Tomando en cuenta el argumento anterior y considerando que los paneles solares solo producen energía durante el día, se debe contemplar un sistema de respaldo de energía (baterías) para que la alimentación eléctrica no se vea afectada en ningún momento.

El presente trabajo propone un sistema combinado entre la Domótica y la alimentación eléctrica a partir de paneles solares y una batería como respaldo de energía. Cabe mencionar que la energía eléctrica producida alimentará exclusivamente a los sensores, actuadores y a la plataforma Arduino Mega; no se suministrará energía proveniente de los paneles a ninguna otra parte de la vivienda.

Materiales y Métodos

En el presente proyecto se contempla la automatización de una vivienda básica (a escala) de las siguientes características: 2 recámaras, 1 sala-comedor, 1 cocina, 1 patio trasero, 1 patio delantero con cochera para un automóvil.

El área total del terreno de la vivienda de interés social es de 90 metros cuadrados de acuerdo al plano mostrado en la Figura 5.

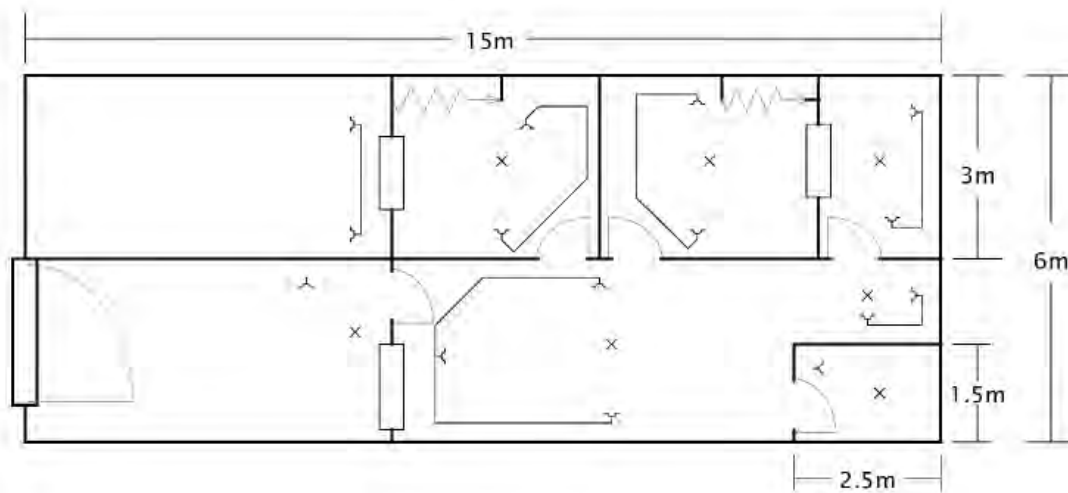


Figura 5. Plano de la vivienda de interés social

Este plano es una representación a escala de una vivienda real de interés social típica de la ciudad de San Luís Potosí.

Los sistemas que se automatizarán son los siguientes:

- Sistema de iluminación exterior
- Sistema de regulación automática de temperatura al interior de la vivienda.
- Sistema de control de riego para el jardín.
- Sistema de detección de intrusos

Sistema Domótico

Para la implementación del sistema de control se tomaron en cuenta cuatro variables físicas de interés: temperatura, humedad, luminosidad y detección de movimiento.

En este contexto, los sensores utilizados fueron los siguientes:

- Termistor NTC de 10 Kiloohms para medición de temperatura.
- Sensor de humedad DHT11
- Fotorresistencia de 2 Megaohms para medición de luminosidad.
- Sensor PIR y ultrasónico para detección de movimiento.

Cada sensor fue acondicionado electrónicamente para que la señal proveniente de ellos se ajustara a los parámetros técnicos señalados por el fabricante de la tarjeta Arduino Mega.

Los sistemas actuadores fueron los siguientes:

- Ventilador de CD para el control de temperatura
- Leds ultrabrillantes para el sistema de iluminación
- Relevador para la activación del sistema de riego
- Buzzer para la emisión de sonido de alarma

De igual manera, para la activación de los sistemas actuadores se implementaron interfaces electrónicas necesarias para su operación. El esquemático del sistema domótico puede apreciarse en la Figura 6.

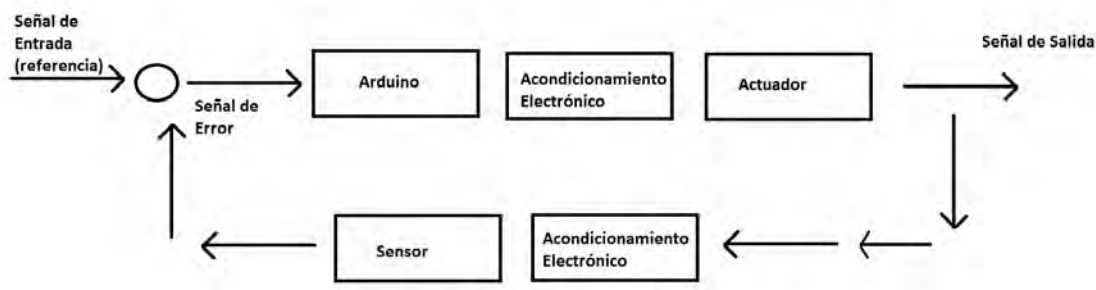


Figura 6. Diagrama del sistema domótico implementado

Consumo de Energía

En base a un análisis de potencia eléctrica consumida por cada elemento, se elaboró la Tabla 1.

Tabla 1. Potencia consumida por elemento y potencia total del Sistema Domótico a escala

COMPONENTE	Cant.	Potencia	Voltaje (V)	Corriente (A)
HC-SR04 (SENSOR ULTRASONICO)	1	75 mW	5	0.015
DHT11 (SENSOR DE HUMEDAD)	1	1.5 mW	5	0.0003
ARDUINO MEGA (PUERTO USB)	1	2500 mW	5	0.5
MOTOR 5V	1	4500 mW	5	0.9
DIODO LED	14	1400 mW	5	0.28
FOTORESISTENCIA LDR (GL55) -LUZ	1	1250 μ W	-	-
FOTORESISTENCIA LDR (GL55) -OBSC	1	12.44 μ W	-	-
TERMISTOR MF52-T=23°C	1	1136.36 μ W	-	-
TERMISTOR MF52-T=24°C	1	54.90 μ W	-	-
TOTAL		12.97W	5	1.7

Conociendo la potencia eléctrica total que consumirá el Sistema Domótico, procedemos a diseñar el sistema de alimentación.

Sistema De Alimentación

Para la parte de la generación de energía eléctrica que alimentará el sistema se implementó mediante los siguientes elementos:

1. 2 Paneles solares de silicio policristalino MULTICOMP de 10 W c/u.



VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL DE PRUEBA

Parámetro	Valor
Fabricante	MULTICOMP
Tipo	Policristalino
Numero de celdas	36
Potencia en MPP (P_{MPP})	10 Watts
Voltaje en MPP (V_{MPP})	17.2 Volts
Corriente en MPP (I_{MPP})	0.57 Ampere
V_{OC}	21 Volts
I_{SC}	0.65 Ampere
α_{SC}	0.39 mA/°K
β_{OC}	-75.6mV/°K

Figura 7. Panel solar utilizado y datos técnicos

El diagrama esquemático del sistema de alimentación puede apreciarse en la Figura 8.

Como respaldo de energía para las horas donde había períodos nublados, estaban en uso todos los elementos del sistema o de noche, se utilizó una batería recargable de litio de 5 Volts a 10,000mAh marca ADATA, misma que se muestra en la Figura 9.



Figura 8. Diagrama del sistema de alimentación



Figura 9. Batería de respaldo para el sistema domótico

Metodología

Con el apoyo de un tesista de licenciatura, la metodología implementada se basó en Teoría-Simulación-Práctica (TSP) de acuerdo a los siguientes pasos:

1. **Teoría:** Se estudiaron las hojas de datos de cada elemento del sistema y se recurrió a la teoría de Circuitos Eléctricos y Electrónica Analógica para deducir consumos de potencia, cuanto voltaje y corriente se necesitaba para alimentar cada elemento y el diseño de los circuitos para regular el voltaje y la corriente proveniente de los paneles solares dado que si se excedía la entrega de corriente a los distintos circuitos, se correría el riesgo de dañar a esos elementos.
2. **Simulación:** Una vez diseñados los circuitos electrónicos, se procedió a realizar las respectivas simulaciones mediante el software PROTEUS el cual nos permite simular placas Arduino así como los diversos sensores y actuadores utilizados en este proyecto.

- 3. Práctica:** Cuando ya se comprobó el correcto funcionamiento en las etapas anteriores, se procede a los alambrados de los distintos circuitos (no se ahondará más en estos temas técnicos dado que escapa a los propósitos de este documento).

Resultados y Discusión

En la Figura 10, se muestra el prototipo de vivienda implementado.



- 90 metros cuadrados
- 2 recámaras
- 1 sala comedor
- Cochera 1 auto
- Jardín
- 1 baño
- 1 cocina
- 1 patio trasero

Figura 10. Maqueta a escala de la vivienda de interés social

En la Figura 11 y 12, se muestran las pruebas a los sensores y actuadores diversos.

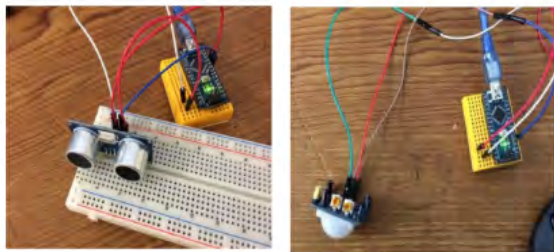


Figura 11. Prueba de diversos sensores



Figura 12. Prueba de diversos actuadores

En la Figura 13, se muestra la tarjeta de desarrollo Arduino Mega utilizada en la etapa final de este proyecto.

En la Figura 14, se muestra la prueba a todos los sensores y actuadores.



Figura 13. Arduino Mega

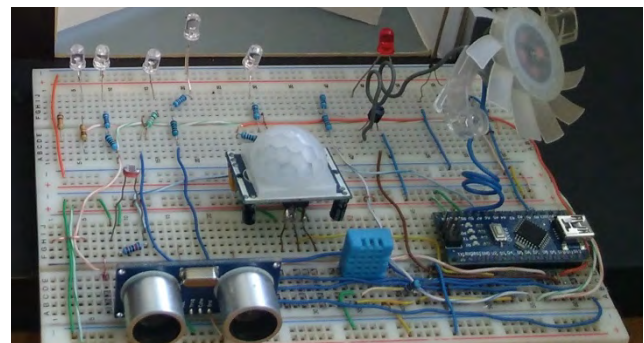


Figura 14. Prueba de todos los sensores y actuadores

En la Figura 15, se muestra la vista frontal e inferior del prototipo terminado.

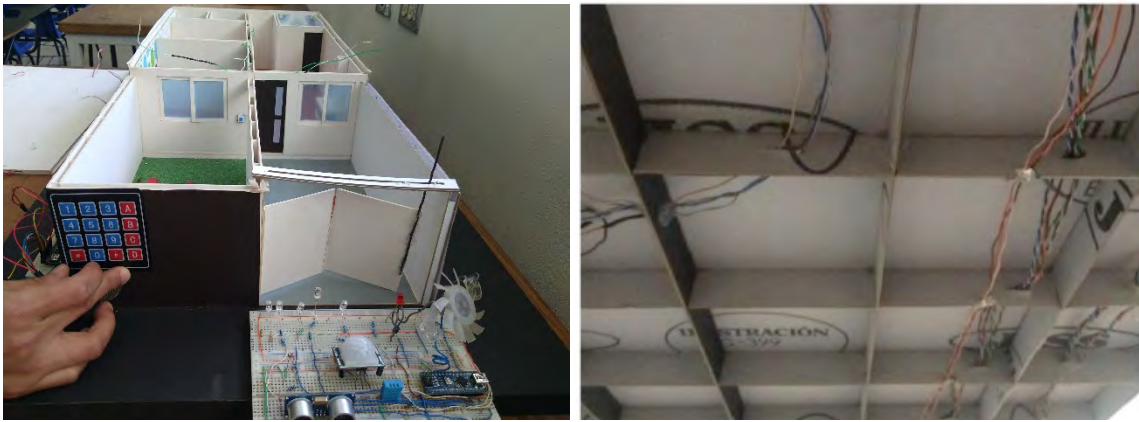


Figura 15. Vista frontal e inferior del sistema domótico

En la Figura 16, se muestran los paneles solares conectados en paralelo para el desarrollo de este proyecto.



Figura 16. Paneles solares en paralelo para alimentar el sistema

Los paneles fueron conectados en paralelo dado que cada uno entrega 21 Volts y 0.6 Amperes por separado. Al conectarlos en paralelo, el voltaje permanece constante en 21 VDC y las corrientes se suman dando un total de 25.2 Watts disponibles para alimentar el sistema.

Ahora, según lo calculado en la Tabla 1, el consumo total del sistema es de aproximadamente 13 Watts; por tanto, tenemos 12 Watts “de sobra” que funcionan como respaldo energético del sistema en caso de sombra o nubosidad.

Además, se cuenta con el respaldo de la batería de 5 Volts y 10 Ah, por lo que la batería por sí misma es capaz de proporcionar 50 Wh y se recarga mediante los mismos paneles durante el día. Si consideramos que durante la noche, los paneles no están generando energía eléctrica y algunos de los elementos del sistema estarán apagados, el respaldo de energía mediante la batería se considera suficiente.

Como trabajo a futuro, se menciona lo siguiente:

- El sistema a escala podría ser implementado en una vivienda real y con elementos de mayor potencia.
- Pueden ser monitoreadas otras variables como, por ejemplo: gas butano, presión de agua, etcétera.
- Se podrían agregar elementos para monitorear el nivel de carga de la batería y asegurarnos que efectivamente se cargó al 100% al final del día.
- Agregar comunicación inalámbrica y mediante internet para que el usuario monitoree los sistemas domóticos en tiempo real en su celular desde cualquier ubicación.

Conclusiones

En este proyecto se desarrolló un sistema Domótico básico a escala orientado a 4 funciones: control de temperatura, luminosidad, humedad y alarma basado en Arduino y alimentado mediante paneles solares.

El proyecto se realizó en colaboración con un alumno de la carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Coordinación Académica Región Huasteca Sur de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí. El mismo realizó su tesis en este proyecto y se tituló en abril de 2022. Actualmente labora en CFE.

El prototipo generado sirvió para la realización de prácticas de otras asignaturas como lo son: Programación de microcontroladores. Electrónica Analógica, Ingeniería de Control y Automatización. Dos estudiantes de servicio social desarrollaron su trabajo en este proyecto y se colaboró con profesores de otras asignaturas para que realizarán su proyecto final de semestre en este trabajo.

Se realizaron asesorías personalizadas a los estudiantes involucrados y se les dio seguimiento puntual en el desarrollo de cada etapa, enfatizando su trabajo en la fase de simulación dado que no se podía implementar el prototipo final, si no se cumplía estrictamente con las simulaciones requeridas.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece la colaboración de los estudiantes de licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica que realizaron su servicio social en este proyecto: Néstor Antonio Rivera e Isaac Iván Inés Joaquín. Asimismo, se agradece la colaboración del alumno Yoshio Josafat del Ángel Rubio quién se tituló el 04 de abril de 2022 mediante tesis profesional con este proyecto. El desarrollo de este proyecto fue llevado a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Eléctrica y Electrónica de la Coordinación Académica Región Huasteca Sur perteneciente a la UASLP. El financiamiento de este proyecto se realizó mediante la convocatoria 2019 para Nuevos Profesores de Tiempo Completo de PRODEP.

Bibliografía

- Ackermann, T. (2005). *Wind power in power systems*. John Wiley.
- Arduino. (2019). <https://www.arduino.cc/>
- Bhuvaneswari, G. (2010). Development of a solar cell model in Matlab for PV based generation system. *2010 IEEE International Energy Conference*.
- Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (10ª ed.). Pearson Educación.
- Carcangiu, S., & Montisci, A. (2012). A building-integrated eolic system for the exploitation of wind energy in urban areas. *Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON) IEEE*.
- Comisión Federal de Electricidad. (2019, julio). Requisitos técnicos para la interconexión de fuentes distribuidas de generación en pequeña escala. <https://www.cfe.gob.mx/>
- Desconzi, M. I., Beltrame, R. C., Rech, C., Schuch, L., & Hey, H. L. (2010). Photovoltaic stand-alone power generation system with multilevel inverter. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'11)*, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April.
- Franquelo, L. G., Rodríguez, J., León, J. I., Kouro, S., & Portillo, R. (2008). The age of multilevel converters arrives. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, junio.
- Harke, W. (2010). *Domótica para viviendas y edificios* (1ª ed.). Editorial Marcombo.
- International Energy Agency. (2019, junio). World Energy Outlook 2019: Executive summary. <https://www.iea.org/>
- Luis Llamas. (abril 2019). <https://www.luisllamas.es>
- Messenger, R. A. (2010). *Photovoltaic systems engineering* (1ª ed.). CRC Press.
- Rekous, D. (2012). *Optimization of photovoltaic power systems* (1ª ed.). Springer.
- Rodríguez Pedroza, G., Lara Vázquez, I., Núñez Olvera, O., López Alanís, J., Lastras-Martínez, L. F., Balderas-Navarro, R., Ortega Gallegos, J., Campos-Cantón, I., & Lastras-Martínez, A. (2012). Autogeneración de energía eléctrica en viviendas unifamiliares de alto consumo en la ciudad de San Luis Potosí: Un análisis económico. *Memorias del XII Encuentro de participación de la mujer en la ciencia*.
- Romero-Morales, C. (2010). *Domótica e Inmótica. Viviendas y edificios inteligentes* (3ª ed.). Ra-Ma Editorial.
- Taller Arduino. (julio 2019). <https://tallerarduino.com>
- U.S. Energy Information Administration. (2019, abril). Annual energy outlook 2019. <https://www.eia.gov/>
- Wu, J. C., & Chou, C. W. (2014). A solar power generation system with a seven-level inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(7), julio.

Valorización bioenergética de residuos del beneficiado húmedo de café mediante digestión anaerobia

Noemi Nava-Valente ^{1,*}, Daniel Simón Olivo-Alanís ¹, Noé Luiz-Santos ¹, Luis Antonio López-Escobar ² y Eduardo Hernández Aguilar ³

¹ Centro de Investigación y Asistencia en tecnología y Diseño del estado de Jalisco, Subsele Noreste, Vía de la Innovación #404, Autopista Mty-Aeropuerto Km. 10 Parque PIIT, C.P. 66628, Apodaca, Nuevo León, México.

² Universidad Politécnica de Huatusco, Calle 22 Sur S/N Col. Reserva Territorial, 94106 Huatusco, Veracruz, México.

³ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana Campus Orizaba, Oriente 6 No. 1009 Colonia Rafael Alvarado, Orizaba 94340, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: nnava@ciatej.mx

Energías Renovables (Waste to Energy)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 2 de octubre de 2025

Publicado: 16 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.607>

Resumen: El café es uno de los principales productos agroindustriales a nivel mundial y su procesamiento genera residuos sólidos y líquidos con elevada carga orgánica y potencial contaminante, como la pulpa y las aguas residuales del beneficiado húmedo. La valorización de estos subproductos mediante digestión anaerobia representa una estrategia alineada con la economía circular, al permitir la generación de bioenergía y la mitigación de impactos ambientales. En este estudio se evaluó la producción de metano a partir de pulpa de café y agua residual del proceso de beneficiado, mediante ensayos en operación batch. Los sistemas fueron monitoreados durante su fase de estabilización considerando parámetros de pH, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos volátiles (SV) y producción acumulada de metano. Asimismo, se analizaron indicadores de eficiencia y se estimó el potencial energético de ambos sustratos en términos de energía térmica y eléctrica, considerando un poder calorífico de 50 MJ/m³ para CH₄ y una eficiencia de conversión eléctrica del 30%. Los resultados mostraron diferencias claras entre ambos residuos. En la pulpa de café, la remoción de DQO y SV alcanzó 36.23% y 38.7%, respectivamente, con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 21 días y una producción acumulada de metano de 1.19 L en condiciones estándar de presión y temperatura. En contraste, el agua residual presentó menores remociones (18.4% de DQO y 20% de SV), un TRH de 5.4 días y un volumen de metano de 0.30 L. En términos energéticos, la pulpa mostró mayor potencial para cogeneración eléctrica (31 MJ/m³), mientras que el agua residual destacó en la fracción térmica (133 MJ/m³), lo que sugiere su aprovechamiento directo en procesos de secado de café. Estos hallazgos evidencian la viabilidad de integrar ambos sustratos en esquemas de valorización energética diferenciada, fortaleciendo la sostenibilidad de la cadena productiva del café mediante el uso eficiente de sus residuos.

Palabras clave: Aguas residuales; Bioenergía; Café; Digestión anaerobia; Pulpa de café

Bioenergy valorization of coffee wet processing wastes through anaerobic digestion

Abstract: Coffee is recognized as one of the main agro-industrial products worldwide, and its processing is associated with the generation of solid and liquid residues with high organic load and polluting potential, such as pulp and wastewater from wet processing. The valorization of these by-products through anaerobic digestion is regarded as a strategy aligned with the circular economy, as it enables bioenergy generation and the mitigation of environmental impacts. In this study, methane production from coffee pulp and wastewater from wet processing was evaluated through batch assays. The systems were monitored during the stabilization phase by measuring pH, chemical oxygen demand (COD), volatile solids (VS), and cumulative methane production. Efficiency indicators were also analyzed, and the energy potential of both substrates was estimated in terms of thermal and electrical energy, considering a calorific value of 50 MJ/m³ for CH₄ and an electrical conversion efficiency of 30%. The results showed clear differences between the two residues. In coffee pulp, COD and VS removals of 36.23% and 38.7%, respectively, were achieved, with a hydraulic retention time (HRT) of 21 days and cumulative methane production of 1.19 L under standard temperature and pressure conditions. In contrast, wastewater exhibited lower removals (18.4% COD and 20% VS), an HRT of 5.4 days, and a methane volume of 0.30 L. In energy terms, coffee pulp presented a higher potential for electricity cogeneration (31 MJ/m³), whereas wastewater stood out for its thermal fraction (133 MJ/m³), suggesting its direct utilization in coffee drying processes. These findings demonstrate the feasibility of integrating both substrates into differentiated energy valorization schemes, thereby strengthening the sustainability of the coffee production chain through the efficient use of its wastes.

Keywords: Wastewater; Bioenergy; Coffee; Anaerobic digestion; Coffee pulp

Introducción

El café es uno de los principales productos básicos comercializados internacionalmente y representa el segundo producto agroindustrial de mayor valor en el mercado. Su consumo ha aumentado de forma sostenida en las últimas décadas, alcanzando 10,620 millones de kg en 2024 (International Coffee Organization, 2024), y se proyecta un incremento anual del 3 % para satisfacer la demanda prevista. Este crecimiento depende en gran medida de la producción a pequeña escala, dado que aproximadamente el 70 % del café mundial es cultivado por más de 25 millones de pequeños caficultores (Acosta-Alba *et al.*, 2020).

Este aumento en el consumo se vincula también con el auge de una cultura cafetera que resalta no sólo su valor social y gastronómico, sino también sus propiedades funcionales y beneficios potenciales para la salud (Hu *et al.*, 2023). En consecuencia, la calidad integral del producto ha cobrado mayor relevancia y está determinada por múltiples factores, que abarcan desde las prácticas agrícolas y las condiciones agroecológicas hasta los métodos de procesamiento, el tostado, la molienda, la preparación y las preferencias del consumidor. Todos estos elementos interactúan y afectan significativamente las características sensoriales y nutraceuticas del café (Freitas *et al.*, 2024).

En este contexto, el método de procesamiento postcosecha adquiere especial relevancia, pues influye tanto en la calidad del grano como en el volumen y tipo de subproductos generados. Los dos métodos predominantes son el procesamiento seco y el húmedo. En el primero, las cerezas se secan al sol con toda su pulpa y, una vez deshidratadas, se retiran la cáscara, el pergamino y la piel plateada. Se trata de un método de bajo costo, dependiente del clima, que suele producir perfiles de sabor más intensos y afrutados. En el segundo, se remueven mecánicamente la cáscara y la pulpa, seguido de una fermentación microbiana para eliminar el mucílago y un posterior lavado y secado del grano. Este método produce cafés con perfiles más limpios y ácidos, aunque conlleva un mayor consumo de agua y requiere un control más estricto. Variantes como el despulpado natural (que conserva el mucílago durante el secado para acentuar notas dulces) y el semi-lavado (que lo elimina por fricción mecánica) buscan optimizar el balance entre atributos sensoriales y eficiencia del proceso (Arya *et al.*, 2022).

Ambos métodos generan grandes volúmenes de residuos orgánicos, estimados en más de diez millones de toneladas anuales (Serna-Jiménez *et al.*, 2022), entre ellos cáscara, hojas, ramas, frutos verdes, pulpa, mucílago, pergamino y cascarilla. En el beneficiado húmedo se añaden aguas residuales con alta carga orgánica y biodegradable. Tradicionalmente, estos residuos se almacenan o se emplean como fertilizantes, un aprovechamiento que no maximiza su potencial (Czekala *et al.*, 2023; Rahmah *et al.*, 2023).

La pulpa de café, principal residuo sólido del beneficiado húmedo, es un material heterogéneo compuesto por el exocarpio y mesocarpio de las cerezas, junto con granos atrapados. Presenta alto contenido de humedad, pH ácido y concentraciones elevadas de carbohidratos, proteínas, lignina y compuestos fenólicos. Su aprovechamiento convencional como fertilizante, compost o alimento para ganado ha mostrado limitaciones debido a la presencia de compuestos antioxidantes, antinutricionales y fitotóxicos como fenólicos, taninos y cafeína (Tsigkou *et al.*, 2025; López-Escobar *et al.*, 2025).

Por su parte, las aguas residuales del beneficiado húmedo pueden variar en volumen y composición según la tecnología y la cantidad de agua utilizada, que en pequeñas empresas oscila entre 2.3 y 23 m³ por tonelada de café procesado (Alemayehu *et al.*, 2020). Estas aguas, empleadas en la despulpa, fermentación y lavado, se caracterizan por un alto contenido orgánico, nutrientes y pH ácido, lo que las convierte en un efluente altamente contaminante. Aunque no existen directrices específicas para su gestión, se han explorado alternativas para su tratamiento, manejo y valorización, siendo clave evaluar su composición para seleccionar la estrategia más adecuada (Tsigkou *et al.*, 2025).

Dada su riqueza en materia orgánica, tanto la pulpa como las aguas residuales constituyen biomasa susceptible de valorización mediante procesos biológicos. Entre ellos, la digestión anaerobia se presenta como una opción versátil, capaz de tratar residuos sólidos y líquidos, y generar simultáneamente biogás (principalmente metano), ofreciendo un doble propósito: mitigación del impacto ambiental y producción de biocombustibles gaseosos (Nava-Valente *et al.*, 2023).

En los últimos años se han propuesto diversas estrategias para la valorización de los residuos generados en el beneficiado húmedo del café. Por ejemplo, el uso de celdas de combustible microbianas (MFC) con aguas residuales de este proceso demostró que las comunidades microbianas nativas pueden remover hasta un 70 % de la materia orgánica y generar voltajes cercanos a 400 mV, lo que confirma su potencial como sistemas de biorremediación y cogeneración eléctrica (Erazo *et al.*, 2023). De manera complementaria, estudios con diseños factoriales en MFC de cátodo abierto evidenciaron que el origen del inóculo influye significativamente en el desempeño electrogénico, alcanzando densidades de potencia de 300–900 mW·m⁻² y tasas de degradación de 500–600 mg·L⁻¹·día⁻¹, lo que valida su viabilidad para tratar efluentes agrícolas en zonas cafetaleras (Agudelo-Escobar *et al.*, 2022). En el caso de residuos sólidos, la pulpa de café ha sido objeto de digestión anaerobia tras pretratamientos térmicos y ácidos, donde el tratamiento a 90 °C favoreció la hidrólisis, redujo el tiempo de retención hidráulica de 21 a 15 días y elevó el rendimiento de biogás hasta un 79.8 % de metano, destacando el papel de los pretratamientos en la optimización de procesos bioenergéticos (Nava-Valente *et al.*, 2023).

Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial energético de los residuos sólidos y líquidos del procesamiento húmedo de café mediante digestión anaerobia.

Materiales y Métodos

Muestreo, acondicionamiento y caracterización de pulpa de café

La pulpa de café, compuesta por la cáscara y el mesocarpio del grano, se obtuvo semanalmente durante la temporada de cosecha en una planta procesadora situada en el municipio de Huatusco, Veracruz, México. El material fue recolectado directamente desde la despulpadora durante el beneficio húmedo y trasladado el mismo día al laboratorio en bolsas de plástico. Para su acondicionamiento, la pulpa se distribuyó en capas delgadas y se cubrió con una lámina plástica transparente, exponiéndola a secado solar durante 3–4 días, aproximadamente 5 horas diarias (11:00–16:00 h), con remoción periódica para favorecer un secado homogéneo (Nava-Valente *et al.*, 2023). Posteriormente, el material seco se sometió a reducción de tamaño hasta permitir su paso por tamiz de 1 mm este procedimiento buscó maximizar el área superficial disponible para la adsorción del sustrato, optimizando la actividad microbiana anaerobia y, en consecuencia, la generación de biogás. Para facilitar la manipulación y evitar posteriores obstrucciones en las tuberías durante el proceso de digestión anaerobia, las muestras se diluyeron con agua corriente hasta alcanzar una concentración de sólidos totales de entre el 3 % y el 5 %. Las muestras se refrigeraron a 4 °C para su posterior caracterización física y química. Las muestras de pulpa de café fueron caracterizadas en términos de pH, demanda química de Oxígeno (total y soluble), Sólidos totales, sólidos volátiles, carbohidratos y fenoles.

Muestreo y caracterización de aguas residuales

Se empleó agua residual generada durante el proceso de beneficiado húmedo de café, recolectada en una planta ubicada en la zona central del municipio de Huatusco, Veracruz. El muestreo se efectuó específicamente en la etapa de lavado posterior a la operación de la desmucilagadora mecánica. Las muestras se obtuvieron en recipientes de plástico con capacidad de 1 L, previamente esterilizados, y se transportaron bajo condiciones de refrigeración (4±2°C) hasta el laboratorio. Posteriormente, se almacenaron en refrigeración controlada (2–8°C) hasta su análisis, con el fin de preservar sus características fisicoquímicas y microbiológicas. Los muestreos se realizaron semanalmente durante cuatro meses durante la época de cosecha de café. Las muestras de agua residual fueron caracterizadas en términos de pH, demanda química de Oxígeno (total y soluble), Sólidos totales, sólidos volátiles, carbohidratos y fenoles.

Digestión anaerobia de la pulpa de café

Se realizaron pruebas digestión anaerobia en lote para muestras de pulpa de café cruda, se emplearon reactores anaerobios escala laboratorio con una capacidad de 500 mL y un volumen de trabajo de 400 mL, cargados con 60 % de pulpa de café (sustrato) y 40 % de lodo anaeróbico (inóculo). La relación sustrato/inóculo (S/I) se determinó en pruebas exploratorias previas, las cuales no se incluyen en este trabajo (Nava-Valente *et al.*, 2023); sin embargo, se demostró que esta relación S/I permitió un comportamiento aceptable en las pruebas de BMP y una capacidad de carga adecuada del proceso. Los experimentos se realizaron por triplicado.

El inóculo de obtuvo del exceso de biomasa de un tratamiento anaerobio para el tratamiento de aguas residuales, el cual tiene 8.08% de Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV), pH=6.80. Se ajustó el valor de pH de la pulpa de café a valores cercanos a 7 mediante la adición de NaOH (40%). Posteriormente, los reactores se cerraron herméticamente y se realizó un intercambio de atmósfera con N₂ durante 3 minutos para desplazar el oxígeno y garantizar condiciones anaerobias. El volumen de metano producido se midió mediante un sistema de desplazamiento de solución de NaOH al 2%, para eliminar la presencia de CO₂ (Vanegas-Padilla *et al.*, 2023), la ejecución de la prueba en lotes se detuvo cuando la producción de metano alcanzó la fase estacionaria y el coeficiente de variación entre las tres últimas mediciones sea inferior a 5%. Los experimentos se realizaron por triplicado.

Digestión anaerobia aguas residuales

Se emplearon frascos serológicos de 120 mL, donde el inóculo utilizado proviene de un digestor anaerobio para el tratamiento de aguas residuales de cervecía, el cual tiene 8.08% de SSV. Los experimentos se realizaron por triplicado.

Se ajustó el pH del agua residual a valores cercanos a 7 mediante la adición de NaOH (40%). A continuación, se mezclaron 80 mL de agua residual con una concentración de inóculo de 1 g SSV/L. Las botellas se sellaron con tapones de teflón y tapas de aluminio, y se realizó un intercambio de atmósfera con N₂ durante 3 minutos para desplazar el oxígeno y garantizar condiciones anaerobias. Posteriormente, las botellas se colocaron en un agitador orbital (Thermo Scientific MaxQ Modelo 4314) a 120 rpm. El volumen de metano producido se midió mediante un sistema de desplazamiento de solución de NaOH al 2%, para eliminar la presencia de CO₂ (Vanegas-Padilla *et al.*, 2023), la ejecución de la prueba en lotes se detuvo cuando la producción de metano alcanzó la fase estacionaria y el coeficiente de variación entre las tres últimas mediciones sea inferior a 5%.

Métodos analíticos

La determinación de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV), Demanda Química de Oxígeno Total y Soluble (DQOt y DQOs) se realizaron según los métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales (American Public Health Association, 2017). Los ST y SV se determinaron utilizando el método 2540G. La DQOt y la DQOs se determinaron utilizando el método 5220D con un espectrofotómetro Thermo Scientific™ Genesys 20. El pH se determinó utilizando un medidor de pH Thermo Scientific™ Orion Star Modelo A1110 (4500-H+A). Los carbohidratos totales y solubles (DuBois *et al.*, 1956), y fenoles totales (Vela, 2015).

La composición del biogás se determinó mediante cromatografía de gases. Para este propósito, se utilizó un cromatógrafo de gases fuera de línea acoplado a un GC Thermo Scientific Ultra-Trace. El GC estaba equipado con una columna Heliflex AT-Q (30 m × 0.53 mm de diámetro) y un detector de conductividad térmica. Las condiciones de operación fueron las siguientes: se utilizó helio a 70 psi como gas portador, la temperatura de la columna fue de 36 °C y la del detector, de 121 °C. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Análisis estadístico

Los datos se presentan como valor medio y se determinó la desviación estándar (±).

El análisis estadístico se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA), la diferencia entre los resultados se consideró significativa si el valor de p era inferior a 0.05, se realizó ANOVA con un nivel de confianza del 95 %. El análisis estadístico se realizó utilizando el software GraphPad Prisma® Version 9.

Modelo cinético de Gompertz modificado

La estimación de los parámetros cinéticos asociados a la producción de biogás durante la digestión anaerobia se realizó mediante el ajuste de los modelos de Gompertz modificado (Ec. 1) (López-Escobar *et al.* 2025 y Méndez-Contreras *et al.* 2024).

$$G(t) = G_0 \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{max} \cdot e}{G_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

Donde: $G(t)$ es la cantidad acumulada de metano producido en el tiempo (L); G_0 es la producción máxima de metano (L); R_{max} es la tasa máxima de producción de metano (L/h o d); λ es el tiempo de la fase de latencia (h o d).

Análisis energético

El análisis energético se evaluó mediante la siguiente ecuación:

$$E_{CH_4} = \frac{(m \cdot Pc) \cdot 1000}{V} \cdot \eta \quad (2)$$

Donde: E_{CH_4} = Energía a partir de metano por litro de reacción; m: masa del CH_4 (kg); Pc: poder calórico del CH_4 (50 MJ/m³); V: volumen del reactor anaerobio (L); η : eficiencia del ciclo de conversión de biogás a electricidad (30%).

Para el cálculo de la energía térmica producida se emplea la Ecuación 2 sin el término de la eficiencia.

Resultados y Discusión

Caracterización de residuos sólidos y líquidos

En la tabla 1 se muestra un resumen de la caracterización fisicoquímica de la pulpa de café y el agua residual del beneficiado húmedo muestra que ambos residuos son de naturaleza marcadamente ácida (pH 5.04 y 4.00, respectivamente), con elevada carga orgánica y predominio de materia biodegradable. La pulpa presenta una DQO total de 16,920 mg/L y un 68.3% en forma soluble, sólidos totales de 53.1 g/L con fracción volátil del 81.8%, el contenido de sólidos volátiles puede atribuirse a la materia orgánica presente en la muestra, ya que, durante la incineración, de acuerdo con Miñón-Fuentes *et al.*, (2019) los productos residuales representan una fase inorgánica o mineral que no se puede volatilizar; por lo tanto, se puede inferir una alta biodegradabilidad.

Por su parte, el agua residual concentró sólidos totales de 28.71 g/L con fracción volátil del 81.1%, alto contenido de carbohidratos solubles (15,073 mg/L) y una concentración de fenoles más de tres veces superior a la de la pulpa (517.5 mg GAE/L), reflejando una alta carga contaminante pero también un potencial considerable para la recuperación de compuestos antioxidantes y su aprovechamiento en procesos fermentativos. Estos resultados evidencian que, aunque ambos residuos representan un riesgo ambiental si se descargan sin tratamiento, su composición los convierte en recursos idóneos para esquemas de valorización en economía circular, combinando extracción de compuestos de valor y procesos biotecnológicos como la digestión anaerobia para la generación de biogás.

Tabla 1. Caracterización física y química de residuos sólidos y líquidos

Parámetro/ unidad	Pulpa de café*	Agua residual*
pH	5.04 ± 0.57	4.00±0.071
DQO Total (mg/L)	16,920 ± 240	58016.66±8170.8
DQO Soluble (mg/L)	11,560 ± 130	46266.66±5424.3
Sólidos Totales (g/L)	53.1 ± 7.8	28.71±5.3
Sólidos volátiles (g/L)	43.43 ± 3.4	24.65±2.31
Carbohidratos (mg/L)	45.31 ± 3.2	15073±5074
Fenoles (mg GAE/L)	165.2±11.3	517.5±20.3

* Los datos se dan como media. ± DE, n = 3

Digestión anaerobia

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos en operación batch, la cual mostró diferencias claras entre los dos sustratos. El pH final se mantuvo en condiciones cercanas a la neutralidad en ambos casos, lo que indicó condiciones favorables para la actividad metanogénica de acuerdo con lo reportado por Moreno *et al.*, (2019) quienes afirman que el pH es

uno de los factores que afectan el proceso de digestión anaerobia, específicamente en la hidrólisis, que es la etapa limitante del proceso general, y que tiene un impacto global en la producción de biogás.

Sin embargo, los indicadores de eficiencia reflejaron contrastes importantes: la remoción de DQO fue mayor para la pulpa de café (36.23%) que en el agua residual (18.4%), lo cual se relaciona directamente con la mayor fracción de sólidos volátiles y carbohidratos disponibles en la matriz sólida. Así mismo, la remoción de sólidos volátiles alcanzó 38.7% en la pulpa, casi el doble que en el agua residual (20%). El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) influyó en el desempeño, ya que la pulpa de café requirió un TRH de 21 d, mientras que el agua residual completó el proceso en 5.4 d.

En cuanto a la producción acumulada de metano, los valores promedio fueron de 1.19 L para la pulpa de café y 0.30 L para el agua residual. Estos resultados ratifican que, aunque el agua residual puede alcanzar un equilibrio más rápido, su potencial energético es menor debido al reducido contenido de sólidos orgánicos biodegradables. Por el contrario, la pulpa de café, con un TRH más prolongado, logra una conversión de materia orgánica más eficiente y un volumen de metano más del triple en comparación con el agua residual. Esta diferencia resalta la importancia de considerar estrategias de acondicionamiento para mejorar el desempeño de las aguas residuales. En este sentido, Rivadavia *et al.* (2025) evaluaron un tratamiento físico-químico asistido (CAPT) mediante coagulación/floculación seguido de flotación por aire disuelto (C/F + DAF), encontrando que dicho pretratamiento no solo disminuyó la turbidez y los compuestos fenólicos inhibitorios, sino que también favoreció la biodegradabilidad y la producción de metano. En contraste con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde el agua residual alcanzó únicamente 0.30 L de CH₄ en batch, los valores reportados por Rivadavia *et al.* (2025) confirman que la aplicación de pretratamientos es clave para incrementar la estabilidad del proceso y potenciar el aprovechamiento energético de corrientes líquidas con elevada carga contaminante.

Tabla 2. Resumen de parámetros de digestión anaerobia en operación batch

Parámetro/ unidad	Pulpa de café*	Agua residual*
pH	6.39±0.10	6.01±0.11
Remoción de DQO (%)	36.23±1.2	18.4±3.2
Remoción SV (%)	38.7±0.15	20.01±2.4
TRH (d)	21	5.4
Volumen acumulado de CH ₄ (L)	1.19±0.13	0.300±0.24

* Los datos se dan como media. ± DE, n = 3

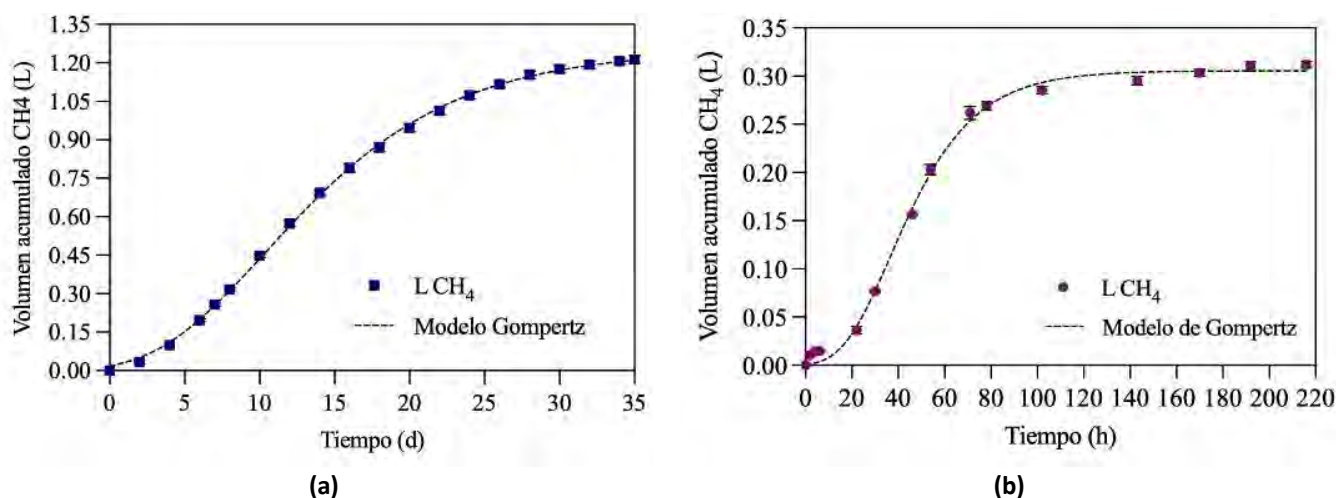
Parámetros cinéticos del modelo de Gompertz modificado

En la Figura 1 se presentan las curvas de producción acumulada de metano ajustadas al modelo modificado de Gompertz para (a) pulpa de café y (b) agua residual del beneficiado húmedo. En ambos casos, el modelo describió de manera adecuada la cinética de digestión anaerobia, con coeficientes de determinación elevados ($R^2 = 0.99$ para pulpa de café y 0.9965 para agua residual), lo que evidencia un buen ajuste a los datos experimentales.

Los parámetros cinéticos mostraron diferencias notables entre los sustratos (Tabla 2). La pulpa de café alcanzó un mayor volumen máximo de metano ($G_0 = 1.251$ L) respecto al agua residual ($G_0 = 0.306$ L), lo que se asocia con su mayor contenido de sólidos volátiles (43.43 g/L) y carbohidratos (45.31 mg/L), que aportan fracciones orgánicas biodegradables. En contraste, la tasa máxima de producción (R_{max}), una vez homogeneizadas las unidades, resultó más elevada en el agua residual (0.1316 L/d) que en la pulpa de café (0.0639 L/d), lo cual indicó que la fracción soluble del agua permitió una producción inicial más rápida, aunque con menor rendimiento acumulado.

El tiempo de fase lag (λ) también reforzó estas diferencias: el agua residual presentó un arranque más corto ($\lambda = 0.67$ d), mientras que en la pulpa se observó un periodo inicial de adaptación más prolongado ($\lambda = 3.17$ d). Sin embargo, la cinética del agua residual, aunque inmediata, se ve limitada por la baja densidad de sustrato biodegradable y la alta concentración de fenoles (517.5 mg GAE/L), que inhibieron parcialmente la actividad metanogénica y restringieron el volumen total alcanzado. En contraste, la pulpa de café, pese a un inicio más lento, sostiene un crecimiento más

prolongado y estable de metano gracias a su elevada carga de sólidos volátiles y carbohidratos, así como a una menor concentración de fenoles (165.2 mg GAE/L).



Los parámetros cinéticos confirmaron que la pulpa sostiene tasas elevadas de metanogénesis tras la fase de adaptación, mientras que el agua residual requiere estrategias de acondicionamiento que permitan aprovechar competitivamente su potencial energético.

Estudios previos realizados por Sumardiono *et al.*, (2021) evaluaron la producción de biogás a partir de pulpa de café y plumas de pollo bajo diferentes condiciones de sólidos totales, relación C/N y pretratamiento de delignificación (NaOH, ajustando la cinética con el modelo de Gompertz. Los mejores resultados se obtuvieron con 25 % ST y una relación C/N de 25 (g/g) en combinación con delignificación, alcanzando una producción de biogás de 10,438 mL y un potencial máximo estimado de 13,498 mL, con una tasa de producción de 419 mL/d y R^2 de 0.9961. Estos valores superan ampliamente la producción observada en nuestro estudio (1.19 L $\approx$ 1,190 mL de metano para pulpa de café en operación batch), lo que resalta la relevancia de los pretratamientos para mejorar la biodegradabilidad de matrices lignocelulósicas y acelerar la conversión bioenergética.

Tabla 3. Resumen de parámetros cinéticos de Gompertz

Parámetro	Pulpa de café	Agua residual	Agua residual unidades normalizadas
G_0	1.25 L	0.3056 L	0.3056 L
R_{max}	0.0639 L/d	0.005482 L/h	0.1316 L/d
λ	3.173 d	16.01 h	0.667 d
R^2	0.99	0.985	0.985

Cálculo de energía

La estimación energética basada en la producción de metano y el poder calorífico del CH_4 (50 MJ/m³) permitió diferenciar el potencial de aprovechamiento de la pulpa y del agua residual del café. Los resultados mostraron que la energía térmica representó la mayor fracción recuperable en ambos casos, con valores cercanos a 106 kJ/L para pulpa y 133 kJ/L para agua residual, mientras que la energía eléctrica derivada del ciclo de conversión alcanza solo alrededor de 31 kJ/L en pulpa y 4 kJ/L en agua residual. Esta diferencia se debe a la eficiencia del proceso de conversión (30%), que limita la fracción de metano transformable en electricidad.

El contraste entre sustratos es relevante: aunque la pulpa ofrece mayor generación eléctrica relativa, el agua residual destacó por su aporte térmico superior, lo que la convierte en un insumo atractivo para aplicaciones donde el calor directo pueda ser utilizado *in situ*. En este sentido, el metano producido podría destinarse a líneas calientes relacionadas con el proceso de secado del café, particularmente en secadores rotatorios de tambor. Estos resultados sugieren que la integración de ambos sustratos podría optimizar la recuperación energética, destinando el biogás del agua residual principalmente a usos térmicos en el secado y el de la pulpa a cogeneración eléctrica, fortaleciendo así esquemas de economía circular en la agroindustria cafetalera.

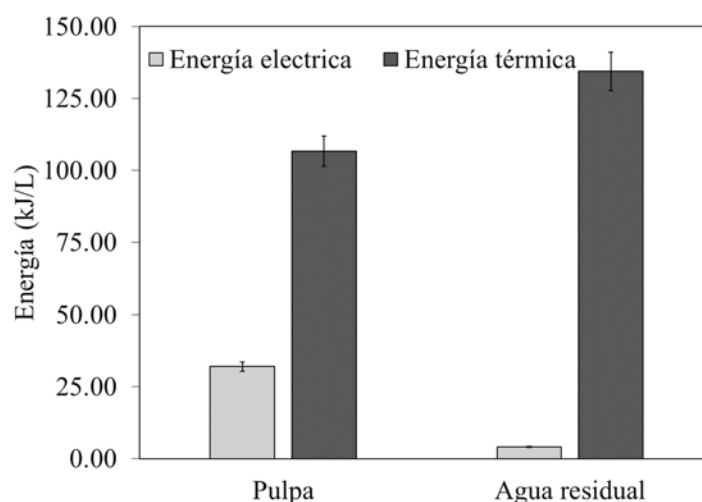


Figura 2. Estimación del aprovechamiento energético de pulpa y aguas residuales del café

Conclusiones

La caracterización comparativa de la pulpa y el agua residual del beneficiado húmedo de café evidenció contrastes relevantes en su potencial bioenergético. En condiciones de operación batch, la pulpa mostró mayor remoción de sólidos volátiles (38.7%) y DQO (36.2%), además de un mayor volumen acumulado de metano (1.19 L), atribuible a su mayor fracción de carbohidratos y compuestos orgánicos biodegradables, aunque requirió un mayor tiempo de retención hidráulica (21 días). Por su parte, el agua residual alcanzó tiempos de estabilización más cortos (5.4 días), con menor conversión de materia orgánica, pero con un aporte energético térmico superior al destinarse a aplicaciones directas de calor.

La estimación energética, basada en el poder calorífico del CH_4 , permitió diferenciar las aplicaciones potenciales: la pulpa como insumo más favorable para cogeneración eléctrica, mientras que el agua residual para aprovechamiento térmico *in situ*, particularmente en procesos industriales de secado de café. Esta complementariedad constituye una aportación novedosa, al proponer un esquema dual de valorización que optimiza el uso de ambos subproductos bajo un enfoque de economía circular. En conjunto, los resultados confirman la viabilidad técnica de integrar residuos sólidos y líquidos del proceso de beneficiado de café en sistemas de digestión anaerobia, contribuyendo tanto a la reducción de la carga contaminante como a la generación sostenible de energía renovable.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores expresan su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento del proyecto de Maduración de tecnologías, mejoramiento de la inventiva y retos tecnológicos para la atención de problemáticas nacionales prioritarias. Categoría A. Proyectos para la maduración de tecnologías y mejoramiento de la inventiva orientados a la atención de problemáticas nacionales prioritarias (No. MADTEC-2025-M-189)

Bibliografía

- Acosta-Alba, I., Boissy, J., Chia, E., & Andrieu, N. (2020). Integrating diversity of smallholder coffee cropping systems in environmental analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(2), 252–266. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01689-5>
- Agudelo-Escobar, L. M., Cabrera, S. E., & Avignone Rossa, C. (2022). A bioelectrochemical system for waste degradation and energy recovery from industrial coffee wastewater. *Frontiers in Chemical Engineering*, 4, 814987. <https://doi.org/10.3389/fceng.2022.814987>

- Alemayehu, Y. A., Asfaw, S. L., & Tirfie, T. A. (2020). Management options for coffee processing wastewater: A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(2), 454–469.
- American Public Health Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Arya, S. S., Venkatram, R., More, P. R., & Vijayan, P. (2022). The wastes of coffee bean processing for utilization in food: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 59(2), 429–444. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05032-5>
- Czekala, W., Łukomska, A., Pulka, J., Bojarski, W., Pochwatka, P., Kowalczyk-Juśko, A., & Dach, J. (2023). Waste-to-energy: Biogas potential of waste from coffee production and consumption. *Energy*, 276, 127604. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127604>
- DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28, 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Erazo, S., & Agudelo-Escobar, L. M. (2023). Determination of electrogenic potential and removal of organic matter from industrial coffee wastewater using a native community in a non-conventional microbial fuel cell. *Processes*, 11(2), 373. <https://doi.org/10.3390/pr11020373>
- Freitas, V. V., Borges, L. L. R., Vidigal, M. C. T. R., dos Santos, M. H., & Stringheta, P. C. (2024). Coffee: A comprehensive overview of origin, market, and the quality process. *Trends in Food Science & Technology*, 146, 104411.
- Hu, S., Gil-Ramírez, A., Martín-Trueba, M., Benítez, V., Aguilera, Y., & Martín-Cabrejas, M. A. (2023). Valorization of coffee pulp as bioactive food ingredient by sustainable extraction methodologies. *Current Research in Food Science*, 6, 100475. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2023.100475>
- López-Escobar, L. A., Olivo-Alanís, D. S., & Nava-Valente, N. (2025). Subproductos del café (*Coffea*): desafíos ambientales y oportunidades para la bioeconomía. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 4(1), 45–49. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.422>
- Miñón-Fuentes, R., & Aguilar-Juárez, O. (2019). Hydrogen production from coffee pulp by dark fermentation. *Water Science and Technology*, 80(9), 1692–1701. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.416>
- Moreno, E. L., & Zapata, A. D. (2019). Biohydrogen production by codigestion of fruits and vegetable waste and coffee mucilage. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(3), 9007–9018.
- Nava-Valente, N., Del Ángel-Coronel, O. A., Atenodoro-Alonso, J., & López-Escobar, L. A. (2023). Effect of thermal and acid pre-treatment on increasing organic loading rate of anaerobic digestion of coffee pulp for biogas production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(6), 4817–4830. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01529-3>
- International Coffee Organization. (2024). *Paving the way for a sustainable future through coffee diplomacy*. <https://www.ico.org/documents/cy2024-25/annual-review-2023-2024-e.pdf>
- Rahmah, D. M., Mardawati, E., Kastaman, R., Pujianto, T., & Pramulya, R. (2023). Coffee pulp biomass utilization on coffee production and its impact on energy saving, CO₂ emission reduction, and economic value added to promote green lean practice in agriculture production. *Agronomy*, 13(3), 904. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030904>
- Rivadavia, R., Rosa, A. P., Nascimento, L. A., Rocha, D. N., Del Rei Passos, F. L., dos Santos Renato, N., & Borges, A. C. (2025). Effects of coagulation/flocculation followed by dissolved air flotation on anaerobic digestion of coffee processing wastewater. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(8), 11645–11658.
- Serna-Jiménez, J. A., Siles, J. A., de los Ángeles Martín, M., & Chica, A. F. (2022). A review on the applications of coffee waste derived from primary processing: Strategies for revalorization. *Processes*, 10(11), 2436. <https://doi.org/10.3390/pr10112436>
- Sumardiono, S., Jos, B., Dewanti, A. A. E., Mahendra, I., & Cahyono, H. (2021). Biogas production from coffee pulp and chicken feathers using liquid- and solid-state anaerobic digestions. *Energies*, 14(15), 4664. <https://doi.org/10.3390/en14154664>
- Tsigkou, K., Demissie, B. A., Hashim, S., Ghofrani-Isfahani, P., Thomas, R., Mapinga, K. F., & Angelidaki, I. (2025). Coffee processing waste: Unlocking opportunities for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 210, 115263. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115263>
- Vanegas-Padilla, A. P., Morales-Miranda, I. J., Vega-Ochoa, M. A., Ortega-Sinning, E. R., & Vanegas-Padilla, D. L. (2023). Evaluación de la producción de biogás a partir de un biodigestor utilizando residuos orgánicos y aguas residuales generadas en la central de abastos de Valledupar. *Revista Politécnica*, 19, 9–19. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v19n37a1>
- Vela, J. C. A. (2015). Modificación del método de Folin-Ciocalteu para la determinación de fenoles totales en muestras complejas. *Revista de Análisis Químico*, 23, 123–130.

Identificación de parámetros para la extracción de glucósidos de *Stevia Rebaudiana* en base seca como una alternativa a los edulcorantes artificiales

Maria Fernanda Castillo-Vargas ¹, Eusebio Bolaños Reynoso ^{1,*}, Leticia Lopez Zamora ¹, René Reyes Estudillo ² y Juan Manuel Mendez Contreras ¹

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba. Orizaba, Ver., México.

² Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Minatitlán. Minatitlán, Ver., México.

* Autor de correspondencia: eusebio.br@orizaba.tecnm.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 22 de septiembre de 2025

Aceptado: 28 de octubre de 2025

Publicado: 16 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.644>

Resumen: Según la Secretaría de Salud (2025), en México más del 75 % de la población adulta tiene sobrepeso u obesidad. Esta condición es el inicio de enfermedades como diabetes y cáncer. Frente a esta problemática, los edulcorantes naturales bajos en calorías, como los derivados de *Stevia Rebaudiana* Bertoni, representan una alternativa viable a los edulcorantes artificiales. Esta planta contiene glucósidos de esteviol (GE), principalmente Rebaudiósido A y Esteviósido, con un alto potencial como sustitutos del azúcar. El presente estudio analizó la influencia de diferentes variables en la eficiencia de extracción de estos compuestos, aplicando un diseño factorial 2⁴ para evaluar sistemáticamente el efecto de la temperatura, el tiempo, el tamaño de partícula y el medio de extracción. Los resultados mostraron que en las variables de respuesta para una mayor concentración de grados Brix (°Bx) e índice de refracción (IR) el factor más significativo es el medio de extracción, siendo el mejor la mezcla 70% etanol- 30 % agua, para el caso del pH el factor más significativo fue el tamaño de partícula siendo mejor utilizar la hoja completa, para maximizar la densidad lo mejor es utilizar baja temperatura, tiempos cortos, partícula en granel y medio agua.

Palabras clave: edulcorantes; glucósidos de esteviol, extracción, diseño de experimentos

Introducción

En las últimas décadas, los hábitos alimenticios han experimentado una transformación significativa, impulsada en gran medida por la creciente conciencia sobre la salud y la nutrición. Una de las principales preocupaciones ha sido el elevado consumo de azúcar y sus efectos negativos, como la obesidad, lo cual es el inicio para enfermedades como la diabetes, cáncer, presión arterial, colesterol alto, triglicéridos elevados y problemas articulares (Potthoff *et al.*, 2024; Jiménez-León, 2021). Esto no sólo afecta la calidad de vida de millones de personas, si no que representan un problema de salud pública en México (Secretaría de salud, 2025). Frente a este panorama, ha surgido un interés particular por los edulcorantes naturales que ofrezcan un sabor dulce sin las calorías ni las consecuencias adversas del azúcar refinado. En este contexto, la *Stevia Rebaudiana* Bertoni (Figura 1), una planta originaria de Sudamérica, se presenta como una opción prometedora (Benítez-Villalba *et al.*, 2022).



Figura 1. Plántula de *Stevia Rebaudiana* Bertoni

La *Stevia* contiene compuestos denominados glucósidos de esteviol (GE) (Tabla 1), principalmente el Esteviósido y el Rebaudiósido A, responsables de su poder edulcorante, el cual puede ser hasta 300 veces superior al del azúcar común. Para que estos compuestos sean utilizados en alimentos y bebidas, es necesario extraer y purificar los glucósidos de sus hojas. Sin embargo para aprovechar estos compuestos es indispensable optimizar el proceso de extracción, la cual depende de varios factores fisicoquímicos como la temperatura, el tipo de solvente, el tiempo de contacto, los cuales determinan la cantidad y calidad del extracto obtenido. Una extracción no adecuada puede disminuir la concentración de los GE, afectar el perfil sensorial y elevar los costos de producción, lo que limita su aplicación a gran escala. Por ello la investigación en técnicas de extracción sólido-líquido representa un paso fundamental para el aprovechamiento de la *Stevia*, fortalecer la producción local y fomentar la innovación en productos naturales con valor agregado.

Tabla 1. Principales glucósidos de esteviol de la Stevia (Preciado Vargas *et al.*, 2020)

Glucósidos	Contenido en % de las hojas en peso seco		
	Makapugay <i>et al.</i> , (1985)	Garnada <i>et al.</i> , (2003)	Goyal y samsher (2010)
Esteviósido	5 a 10	5.8 ± 1.3	9.1
Rebaudiósido A	2 a 4	1.8 ± 0.2	3.8
Rebaudiósido C	1 a 2	1.3 ± 0.4	0.6
Dulcósido	0.4 a 0.7	ND	0.3

El proceso de extracción (Figura 2) comienza con la deshidratación y molienda de las hojas, seguida de la ebullición con agua o solventes hidroalcohólicos a una temperatura entre 80 y 90 °C. Posteriormente, se eliminan impurezas mediante filtración. El extracto resultante, que contiene una mezcla de glucósidos, se concentra y se somete al proceso de cristalización (González *et al.*, 2017). En este trabajo se desarrollaron técnicas de extracción siguiendo un diseño experimental (DoE) y análisis estadístico (ANOVA) para evaluar la influencia de variables clave como temperatura, tiempo, tamaño de partícula y medio de extracción sobre los parámetros como grados Brix, densidad, índice de refracción y pH. Por lo tanto, el objetivo final es maximizar la extracción de los glucósidos de esteviol y producir Stevia líquida de manera eficiente, reproducible y sustentable ofreciendo una alternativa natural.

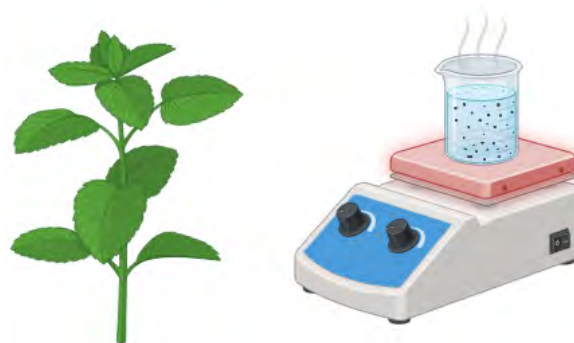


Figura 2. Extracción de Stevia

Desarrollo

Extracción por ebullición

La extracción por ebullición es un método eficiente y sencillo para obtener GE (Esteviósido y Rebaudiósido A) a partir de las hojas de Stevia seca de 3.5 cm de largo. Este método se basa en la solubilización de los compuestos bioactivos en agua caliente, facilitando su separación del material vegetal.

Para llevar a cabo la extracción por ebullición (Figura 3), primero se pesaron 5 g de la muestra y se pusieron dentro de la esfera de ebullición metálica con apertura de 3 mm, posteriormente se midieron 540 mL del solvente y se vertieron en un recipiente de acero inoxidable. Se introdujo la esfera y se llevó a una ebullición controlada manteniendo la temperatura a 90 °C para el caso del agua y a 70 °C en el caso del etanol-agua, empleando un sistema de control de temperatura tipo On/Off (relevador de estado sólido); hasta que el solvente se redujo a la mitad, se retiró la muestra, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se filtró al vacío para eliminar los residuos sólidos y obtener un extracto líquido más puro, por último se almacenaron en frascos a 4 °C, con el fin de cuantificar la variables de respuesta °Bx, índice de refracción, densidad y pH.



Figura 3. Extracción por ebullición

Grados Brix

Se realizó bajo la NMX-F-103-1982. El procedimiento inicia con la calibración del refractómetro utilizando agua destilada, asegurando que el equipo marque un valor de 0°Bx, lo que garantiza mediciones precisas. La medición se

llevó a cabo con un refractómetro portátil ATAGO HSR 500 con un rango de 0 a 90 °Bx, se colocaron cuatro gotas de la muestra sobre la superficie del prisma del refractómetro, se cerró la tapa y se observó a través del visor, donde se identifica el punto en el que la línea de demarcación entre luz y sombra coincide con la escala de Brix., se realizaron cuatro lecturas de cada extracto.

Índice de Refracción

El índice de refracción es una constante óptica que caracteriza a cada sustancia y es dependiente de la temperatura. Se utiliza para determinar la composición, pureza, concentración, comportamiento óptico, entre otros. Se realizó bajo la NMX-F-807-SCFI-2018, se utilizó un refractómetro Abbe, Antes de realizar cualquier medición, se calibra el refractómetro utilizando agua destilada como estándar de referencia. Se coloca una gota de agua destilada en el prisma y se ajusta el tornillo de calibración hasta que la lectura indique el índice de refracción del agua ($n_D = 1.3330$ a 20°C) Se limpia el prisma con un paño suave y sin pelusas, se vertieron 4 gotas de la muestra en el prisma inferior, se cerró el prisma superior y se aseguró con la perilla, asegurarse que la muestra cubra de forma uniforme el prisma y sin burbujas, girar el tornillo de ajuste hasta que la escala muestre el valor de referencia.

pH

Se realizó por el método potenciométrico de la NMX-F-317-NORMEX-2013 para el cual se utilizó un potenciómetro de bolsillo modelo HI98130 de Hanna instruments, primero se realizó la calibración del equipo con soluciones buffer de 4, 7 y 10. Posteriormente se enjuagó con agua destilada y se procedió a introducir el bulbo hasta que queda cubierto por la muestra, se agitó y se tomó la lectura cuando el equipo se estabilizó, una vez tomada la lectura se saca el equipo se enjuaga con agua destilada y se secó con un paño suave antes de utilizarlo nuevamente. Se realizaron cuatro lecturas por cada muestra.

Densidad por picnómetro

Se realizó bajo la ISO 758:1976. Primero se procedió a lavar el picnómetro y secarlo en estufa hasta peso constante, se sacó y se dejó enfriar para tomar su peso con una balanza analítica (anotar el peso del picnómetro vacío, se llenó el picnómetro con la muestra hasta el borde y se cerró con el capilar el cual debe quedar completamente lleno, se secó el picnómetro y se vuelve a pesar con balanza analítica, anotar el peso con la muestra.

Diseño Experimental factorial

Los diseños factoriales se emplean comúnmente en experimentos donde intervienen múltiples factores, permitiendo analizar su efecto combinado sobre una variable de respuesta. Dentro de estos diseños, existen variantes que son ampliamente utilizadas en la investigación debido a su aplicabilidad práctica y a que sirven como base para el desarrollo de otros modelos experimentales de gran utilidad.

Uno de los casos más relevantes es aquel en el que se consideran k factores, cada uno evaluado en dos niveles, los cuales pueden ser cuantitativos o cualitativos. Un diseño factorial completo con esta configuración implica la realización de 2^k corridas experimentales, por lo que se denomina diseño factorial 2^k . Este tipo de diseño es particularmente valioso en las etapas iniciales de un estudio experimental, ya que permite analizar simultáneamente varios factores con un número mínimo de ensayos.

Dado que en este enfoque cada factor solo tiene dos niveles, se asume que la relación entre la respuesta y los niveles de los factores es aproximadamente lineal dentro del intervalo de estudio. Esta característica hace que el diseño 2^k sea una herramienta eficiente para identificar factores significativos y orientar futuras optimizaciones en los experimentos (Montgomery, 2017). El análisis estadístico de estos diseños permite hacer inferencias sobre una población a través de un muestreo aleatorio y puede ser replicado o no. El análisis requiere de un intervalo de confianza específico (95%) para determinar la significancia de $p < 0.05$ de los factores puros e interacciones establecidos por el experimentador (modelo de efectos fijos), así como el error experimental.

Diseño Factorial 2⁴Tabla 2. Diseño completo 2⁴

Factores									Variables de respuesta			
Nivel	Temperatura (°C)	Tiempo de extracción (min)	Tamaño de partícula (cm)	Medio de extracción	Grados Brix (°Bx)	IR	Densidad (g/ml)	pH				
Alto	90	18	Granel (3.5)	Agua	Etanol 70 % - Agua 30 %							
Bajo	80	12	pulverizado									
Alto	70	18	Granel (3.5)									
Bajo	60	12	pulverizado									

El diseño factorial 2⁴ se compuso de cuatro factores, cada uno con un nivel bajo (-1) y un nivel alto (+1), con 4 variables de respuesta definidos en la Tabla 2. El diseño factorial 2⁴ genera 16 combinaciones experimentales, lo cual permitió evaluar el efecto de cada factor y sus interacciones (Tabla 2) (Montgomery, 2017).

Resultados y discusión*Resultados de las extracciones de glucósidos de esteviol*

La Tabla 3 muestra los resultados de los factores evaluados donde el factor A representa a la temperatura, B el tiempo de extracción, C el tamaño de partícula y D el medio de extracción, se realizó un DoE 2⁴ sin réplica con 4 mediciones, (Montgomery, 2017) se hizo un promedio en el cual se empleó el software Minitab 18.1 2017 (Minitab, LLC, Estados Unidos) para el análisis estadístico del proceso a partir de los datos experimentales. Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con un intervalo de confianza de 0.95 95 y criterio de rechazo de la hipótesis nula Ho con un valor de probabilidad P de $\alpha < 0.05$.

Tabla 3. Experimentos de extracción de azúcares levógiros de Stevia

Orden estándar	Orden de corrida	A	B	C	D	°Bx prom	IR prom	p prom	PH prom
1	9	-1	-1	-1	-1	18.13	1.624	0.9906	6.31
2	12	1	-1	-1	-1	14.75	1.621	0.9242	6.34
3	16	-1	1	-1	-1	18.50	1.627	0.9930	6.77
4	14	1	1	-1	-1	14.00	1.621	0.9904	6.30
5	5	-1	-1	1	-1	18.88	1.628	0.9144	7.93
6	6	1	-1	1	-1	18.13	1.623	0.9242	7.98
7	8	-1	1	1	-1	11.13	1.620	0.9150	6.66
8	2	1	1	1	-1	17.50	1.625	0.9289	6.88
9	10	-1	-1	-1	1	1.25	1.611	0.9894	6.21
10	11	1	-1	-1	1	2.00	1.614	0.9143	6.11
11	13	-1	1	-1	1	1.00	1.611	0.9906	6.92
12	15	1	1	-1	1	3.00	1.615	0.9930	6.85
13	3	-1	-1	1	1	2.00	1.615	0.9899	6.82
14	4	1	-1	1	1	1.00	1.612	0.9150	7.45
15	7	-1	1	1	1	1.25	1.610	0.9899	6.14
16	1	1	1	1	1	0.00	1.614	0.9929	7.01

Tabla 4. Valores descodificados

Factor	Bajo (-)	Alto (+)
A: Temperatura	60-70 °C	80-90°C
B: Tiempo de extracción	90 min	120 min
C: Tamaño de partícula	Granel	Pulverizado
D: Medio de extracción	Alcohol /Agua	Agua

Análisis de resultados Grados Brix

Tabla 5. Análisis de Varianza de °Brix

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	917.816	101.980	17.84	0.00113858
Lineal	4	899.121	224.780	39.33	0.00019289
A	1	0.191	0.191	0.03	0.86082513
B	1	5.941	5.941	1.04	0.34726851
C	1	0.473	0.473	0.08	0.78334890
D	1	892.516	892.516	156.16	0.00001606
Interacciones de 2 términos	5	18.695	3.739	0.65	0.67093638
A*B	1	3.063	3.063	0.54	0.49175909
A*C	1	4.516	4.516	0.79	0.40829908
A*D	1	0.473	0.473	0.08	0.78334890
B*C	1	6.891	6.891	1.21	0.31430180
B*D	1	3.754	3.754	0.66	0.44863619
Error	6	34.293	5.715		
Total	15	952.109			

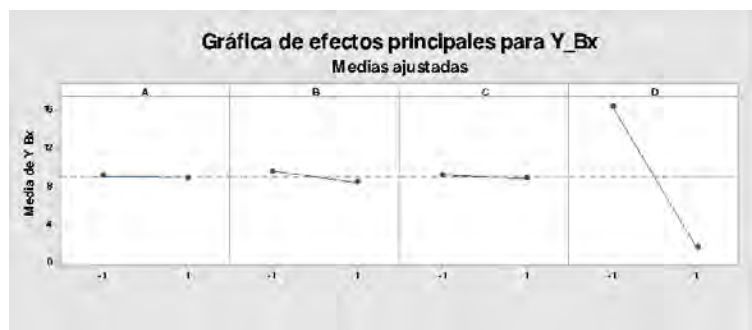
El ANOVA (Tabla 5) muestra suficientes grados de libertad, donde no hay interacciones significativas ya que todas presentan un valor $p > 0.05$. Se determina que es un modelo de efectos fijos ya que los niveles de los factores fueron especificados por el experimentador.

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$Y_{Bx} = 8.906 - 0.109A - 0.609B - 0.172C - 7.469D + 0.437A * B + 0.531A * C + 0.172A * D - 0.656B * C + 0.484B * D \quad (1)$$

Se observó (Figura 4) que el Factor A (temperatura) no tiene un efecto importante en los °Brix ya que la línea es casi plana, el Factor B (Tiempo de extracción) muestra que tiempos más largos tienden a disminuir un poco el °Brix, en el caso del Factor C (Tamaño de partícula) no influye en los °Bx. Siendo el único factor significativo el D (medio de extracción). Entre mayor sea la pendiente es más significativo el factor. Factor D (medio de extracción).

Utilizando el método de optimización en Minitab para encontrar un máximo (Figura 4), A se debe trabajar en bajo (pero puede ser en alto al no ser significativo), B en bajo (pero puede ser en alto al no ser significativo), C en bajo (pero puede ser en alto al no ser significativo) y D en bajo (significativo). El mayor contenido de °Bx que se obtuvo de las extracciones fue de 18.9 cuyo rendimiento fue de 48.5 %.



(a)

Solución

Solución	A	B	C	D	Y_Bx Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	-1	-1	-1	-1	18.2344	0.966060

(b)

Figura 4. (a) Gráfica de efectos puros para °Bx y (b) Tabla de optimización para °Bx

Análisis de resultados para pH

Del ANOVA (Tabla 6), para el modelo con interacciones dobles se obtuvo el valor de $p = 0.00302$, lo que indica que es altamente significativo, es decir que explica de forma adecuada la variación del pH. El factor C y la interacción AC son significativos al igual que BC y CD, lo cual coincide con la gráfica normal de efectos.

Tabla 6. ANOVA para pH

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	10	4.99783	0.49978	16.91	0.00302
Lineal	4	2.02381	0.50595	17.12	0.00402
A	1	0.08410	0.08410	2.85	0.15244
B	1	0.16402	0.16402	5.55	0.06509
C	1	1.60656	1.60656	54.36	0.00072
D	1	0.16913	0.16913	5.72	0.06222
Interacciones de 2 términos	6	2.97402	0.49567	16.77	0.00358
A*B	1	0.00019	0.00019	0.01	0.93936
A*C	1	0.34663	0.34663	11.73	0.01874
A*D	1	0.14062	0.14062	4.76	0.08098
B*C	1	1.79895	1.79895	60.87	0.00055
B*D	1	0.33062	0.33062	11.19	0.02045
C*D	1	0.35701	0.35701	12.08	0.01774
Error	5	0.14778	0.02956		
Total		15	5.14561		

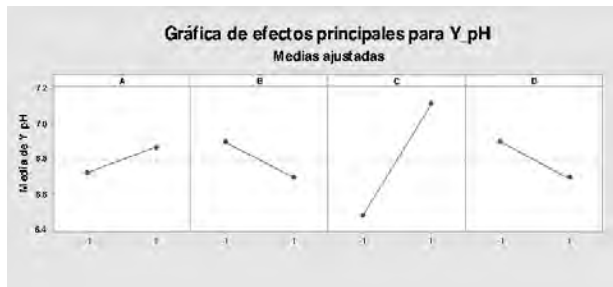
A continuación, se menciona el modelo obtenido:

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$Y_{pH} = 6.7903 + 0.0725A - 0.1013B + 0.3169C - 0.1028D + 0.1472A * C - 0.3353B * C + 0.1437 B * D - 0.1494C * D \quad (2)$$

La gráfica de efectos principales (Figura 5a) muestra cómo se deben trabajar los valores para una maximización, la línea de en medio tiene un valor de 6.8 lo cual significa la media. Para maximizar la temperatura se debe mantener en un rango de 80 a 90 °C, el tiempo de extracción a 90 min, con un tamaño de partícula a granel y el medio de extracción se debe utilizar la mezcla etanol 70 % - Agua 30 %. La tabla de optimización (Figura 5b) indicó que para obtener un pH

óptimo de 7, A debe trabajarse en nivel bajo, B debe trabajarse en nivel bajo, C debe trabajarse en nivel alto y D en nivel alto. El mejor pH obtenido fue 7.01 con un rendimiento en la extracción del 50 %.



(a)

Solución

Solución	A	B	C	D	Y_pH Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	-0.8630	-0.9621	0.9495	0.8141	7	1

(b)

Figura 5. (a) Gráfica de efectos principales para pH y (b) Tabla de optimización pH=7

Análisis de resultados para densidad

En la Tabla 7 (ANOVA), se observa que los factores A, B, C y D son significativos sobre la variable de respuesta (densidad). La interacción AB y CD son significativas. Cuando hay interacciones dobles significativas resulta más importante concluir en base a ellas. En el ANOVA se observa que el valor de p para A = 0.0493, B = 0.0252, C = 0.0326, D = 0.0457 y las interacciones AB = 0.0288 y CD = 0.0322; todos ellos menores al $\alpha = 0.05$, por lo que se determina que son significativas.

Tabla 7. ANOVA para densidad

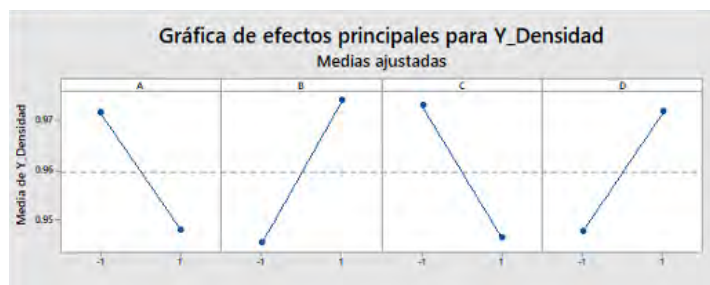
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	10	0.018755	0.001876	5.56	0.03605
Lineal	4	0.010854	0.002714	8.04	0.02098
A	1	0.002249	0.002249	6.67	0.04930
B	1	0.003353	0.003353	9.94	0.02530
C	1	0.002893	0.002893	8.58	0.03268
D	1	0.002359	0.002359	6.99	0.04573
Interacciones de 2 términos	6	0.007901	0.001317	3.90	0.07828
A*B	1	0.003114	0.003114	9.23	0.02881
A*C	1	0.000546	0.000546	1.62	0.25935
A*D	1	0.000618	0.000618	1.83	0.23378
B*C	1	0.000266	0.000266	0.79	0.41541
B*D	1	0.000440	0.000440	1.30	0.30537
C*D	1	0.002918	0.002918	8.65	0.03221
Error	5	0.001687	0.000337		
Total	15	0.020442			

A continuación, se menciona la ecuación del modelo obtenido:

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$Y_{\text{densidad}} = 0.95973 - 0.01186A + 0.01448B - 0.01345C + 0.01214D + 0.01395A * B + 0.00584A * C - 0.00622 A * D - 0.00408B * C + 0.00524B * D + 0.01350C * D \quad (3)$$

La gráfica de efectos (Figura 6a) indica que todo los efectos son significativos y para maximizar la densidad A se debe trabajar en bajo, B en alto, C en bajo y D en alto. De la tabla de optimización (Figura 6b), para obtener la maximización en la densidad A se debe trabajar en bajo, B en alto, C en bajo y D en alto lo cual coincide con la gráfica de efectos principales. La distribución normal de los datos es confiable al 95 % en el rango de densidad de 0.96 a 1.04. La densidad más alta obtenida en los experimentos fue de 0.9930 con un rendimiento del 70.4 %.



(a)

Solución

Solución	A	B	C	D	Y_Densidad Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	-1	-1	-1	-1	18.2344	0.966060

(b)

Figura 6. (a) Gráfica de efectos principales para densidad y (b) Tabla de optimización para maximizar densidad

Análisis de resultados para índice de refracción

El ANOVA con para IR (Tabla 8) mostró que el modelo es significativo $p = 0.0279$ con una R^2 del 92.63 %, al menos un factor en las variaciones del IR. Temperatura (A) no significativa, Tiempo de extracción (B) no significativo, Tamaño de partícula (C) no significativa, medio de extracción (D) altamente significativo, ninguna interacción fue significativa.

Tabla 8. ANOVA para datos de IR

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	10	0.000519	0.000052	6.28	0.027925
Lineal	4	0.000475	0.000119	14.38	0.005969
A	1	0.000000	0.000000	0.01	0.934069
B	1	0.000002	0.000002	0.19	0.681789
C	1	0.000001	0.000001	0.07	0.804561
D	1	0.000473	0.000473	57.25	0.000639
Interacciones de 2 términos	6	0.000044	0.000007	0.89	0.564741
A*B	1	0.000014	0.000014	1.70	0.248848
A*C	1	0.000001	0.000001	0.07	0.804561
A*D	1	0.000018	0.000018	2.19	0.199320
B*C	1	0.000011	0.000011	1.28	0.309502
B*D	1	0.000000	0.000000	0.01	0.934069
C*D	1	0.000001	0.000001	0.07	0.804561
Error	5	0.000041	0.000008		
Total	15	0.000560			

La ecuación del modelo se menciona a continuación:

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$Y_{IR} = 1.61819 - 0.000062A - 0.000312B + 0.000188C - 0.005437D + 0.000937A * B + 0.000188A * C + 0.001063A * D - 0.000812B * C + 0.000062B * D - 0.000187C * D \quad (4)$$

Tabla 9. Tabla de optimización para maximizar IR

Solución						
Solución	A	B	C	D	Y_IR Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	-1	-1	1	-1	1.62706	0.947917

De la Tabla 9, se determina que A (temperatura) se puede trabajar en alto o bajo ya que no fue significativa, sin embargo de la tabla de optimización para una maximización en el IR, se observa que A se debe trabajar en bajo (60 - 70 °C), el tiempo de extracción (B) se puede trabajar en alto o bajo por no ser significativo, el optimizador establece que se debe trabajar en bajo (90 min), el tamaño de partícula (C) también se puede trabajar en alto o bajo, pero en el optimizador se recomienda trabajarlo en alto (pulverizado), y el tiempo de extracción (D) debe trabajarse necesariamente en bajo con una mezcla de etanol 70 % - agua 30 %. El mayor índice de refracción obtenido fue de 1.6280 con un rendimiento del 48.5 %.

Conclusiones

A través de la caracterización de materias primas, la ingeniería de proceso, el diseño experimental y herramientas de optimización, es posible transformar un recurso natural, en este caso la Stevia en un producto de alto valor añadido. Así, el extracto no solo endulza, sino que también aporta soluciones saludables a una sociedad que busca alimentarse mejor sin renunciar al sabor.

El análisis estadístico del diseño 2^4 con cuatro variables de respuesta independientes permitió identificar los factores más relevantes en el proceso de extracción de glucósidos de esteviol. Para el contenido de °Brix, el factor determinante fue el medio de extracción (D) sin interacciones significativas, En el caso del pH, el comportamiento se explicó principalmente por el tamaño de partícula (C) con interacciones dobles significativas lo que evidencia que esta variable es más sensible a combinaciones de condiciones que a factores individuales. Respecto a la densidad ningún efecto puro fue significativo sin embargo, considerando las interacciones dobles, el Factor importante es B (tiempo de extracción) y algunas interacciones son significativas. Finalmente, para el índice de refracción, el medio de extracción (D) fue el único factor estadísticamente significativo, descartando los demás factores o interacciones dobles al no ser significativas.

En conjunto, los resultados demuestran que el medio de extracción es la variable más influyente en la mayoría de las respuestas, obteniendo mayor contenido de °Bx e IR en las extracciones donde se utilizó la mezcla etanol-agua lo cual coincide con lo reportado por Ciulu *et al.* (2017). Estas conclusiones aportan criterios claros para la optimización del proceso, permitiendo seleccionar las condiciones experimentales adecuadas en función de la variable de calidad que se busque priorizar y método de purificación que se requiera emplear.

Bibliografía

- Benítez-Villalba, J. C., Grau-Torales, M. L., Cristaldo-López, O. D., Bogado-Fernández, A. I., Arrúa-Martínez, L. A., y Villalba-Villalba, N. M. (2025). Determinación y cuantificación de glucósidos de esteviol en las hojas de Stevia comercial (*Stevia rebaudiana* Bertoni) mediante cromatografía de líquido de alta resolución (HPLC). *Reportes Científicos de la FACEN*, 13(2), 194–205. <https://doi.org/10.18004/rcfacen.2022.13.2.194>
- Castelló Mateo, R. (2023). *Efectos negativos de los azúcares simples y refinados sobre la salud y el rendimiento del deporte de resistencia* (Trabajo fin de grado). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Ciulu, M., Quirantes-Piné, R., Spano, N., Sanna, G., Borrás-Linares, I., y Segura-Carretero, A. (2017). Evaluation of new extraction approaches to obtain phenolic compound-rich extracts from *Stevia rebaudiana* Bertoni leaves. *Industrial Crops and Products*, 108, 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.024>
- Gardana, C., Simonetti, P., Canzi, E., Zanchi, R., y Pietta, P. (2003). Metabolism of stevioside A from *Stevia rebaudiana* extracts by human microflora. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(22), 6618–6622. <https://doi.org/10.1021/jf0303619>
- González, J. J. H., Navarrete, A. T., López, A. C., Mercado, C. R., Uribe, J. A. R., y Ancona, D. B. (2017). Extracción de glucósidos edulcorantes de *Stevia rebaudiana* Bertoni por métodos de fluidos supercríticos. *Journal of Negative and No Positive Results (JONNPR)*, 2(5), 202–209. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5972918>
- Goyal, S., y Samsher, R. (2010). *Stevia (Stevia rebaudiana)* as a biosweetener: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 61, 1–10. <https://doi.org/10.3109/09637480903193049>

- ISO 758:1976. (1976). *Liquid chemical products for industrial use — Determination of density at 20 degrees C.* <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/00/50/5035.html> Consultado el 16 de mayo de 2025.
- Jiménez-León, M. (2021). Consumo de azúcares libres y sus efectos negativos en la salud. *Revista Qualitas*, 22(22), 73–89. <https://doi.org/10.55867/qual22.06>
- Makapugay, H. C., Nanayakkara, N. D., Soejarto, D. D., y Kinghorn, A. D. (1985). High-performance liquid chromatographic analysis of the major sweet principle of Lo Han Kuo fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 33(3), 348–350. <https://doi.org/10.1021/jf00063a007>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- NMX-F-103-1982. (2009). *Alimentos–frutas y derivados–determinación de grados Brix*. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5115493&fecha=22/10/2009#gsc.tab=0 Consultado el 25 de agosto de 2025.
- NMX-F-317-NORMEX-2013. (2013). *Alimentos. Determinación de pH en alimentos y bebidas no alcohólicas. Método potenciométrico*. <https://www.yucatan.gob.mx/mejora-regulatoria/regulacion.php?v=6444d8ac> Consultado el 13 de mayo de 2025.
- NMX-F-807-SCFI-2018. (2018). *Alimentos para humanos–aceites esenciales, aceites y grasas vegetales o animales–determinación del índice de refracción con refractómetro de Abbe*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/7605/seeco14_C/seeco14_C.html Consultado el 17 de mayo de 2025.
- Potthoff, J., Polz, A., Ulbrich, D. A., Osmani, F., y Schienle, A. (2024). Consequences of positive vs. negative information concerning the amount of sugar consumption on appetite, mood, and visual food cue attention: Findings from two online interventions. *Eating Behaviors*, 52, 101842. <https://doi.org/10.1016/j.eatbeh.2024.101842>
- Preciado Vargas, A. G., Bolaños Reynoso, E., y Sánchez Sánchez, K. B. (2020). *Cristalización del glucósido de esteviol (Rebaudiósido A) como sustituto edulcorante de la sacarosa para la mejora de la DTC y masa formada*. Orizaba, México: Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Secretaría de Salud. (2025). *Secretaría de Salud llama a la población a sumarse a la lucha contra la obesidad*. <https://www.gob.mx/salud/prensa/044-secretaria-de-salud-llama-a-la-poblacion-a-sumarse-a-la-lucha-contra-la-obesidad> Consultado el 1 de junio de 2025.

Modelado del impacto paisajístico para la planificación de plantas fotovoltaicas en tres valles fisiográficos de Veracruz, México

Katia Fernández-González ^{1,*}, Gabriela Díaz-Félix ², José Angel Bonilla-Osorio ² y Carlos Manuel Welsh-Rodríguez ¹

¹ Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México

² Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: katia.fergon@outlook.es

Energías Renovables (Energía solar)

Recibido: 19 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 19 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.591>

Resumen: Este estudio propone un marco de modelado geoespacial para evaluar los impactos del paisaje en la planificación territorial de plantas solares fotovoltaicas en tres valles fisiográficos en Veracruz, México: Perote, Córdoba-Orizaba y Papaloapan. Al abordar la rápida expansión de la energía solar en México y la comprensión limitada del potencial espacial de Veracruz, la metodología integra datos de código abierto sobre la cobertura vegetal, la topografía y la visibilidad del paisaje. Los análisis espaciales en RStudio incluyeron la reclasificación del uso de la tierra por fragilidad visual, el cálculo de la visibilidad acumulada de los puntos de observación simulados y la ponderación de la sensibilidad visual del paisaje. Los hallazgos revelan que más del 90% de la superficie de cada valle tiene un bajo impacto paisajístico, lo que indica una alta idoneidad para el desarrollo fotovoltaico con una mínima perturbación visual. Papaloapan exhibe la mayor estabilidad visual, mientras que Perote y Córdoba-Orizaba contienen zonas críticas localizadas que pueden abordarse mediante una planificación específica. El enfoque de código y datos abiertos garantiza una alta replicabilidad en otras regiones, ofreciendo una sólida herramienta de apoyo a la toma de decisiones para ubicar las plantas solares al tiempo que minimiza los impactos visuales y promueve la integración del paisaje.

Palabras clave: energía solar, infraestructura fotovoltaica, planificación territorial, evaluación multicriterio, México

Landscape impact modeling for the territorial planning of photovoltaic plants in three physiographic valleys of Veracruz, México

Abstract: This study proposes a geospatial modeling framework to evaluate landscape impacts in the territorial planning of photovoltaic solar parks across three physiographic valleys in Veracruz, Mexico: Perote, Córdoba–Orizaba, and Papaloapan. Addressing the rapid expansion of solar energy in Mexico and the limited understanding of Veracruz’s spatial potential, the methodology integrates open-source data on vegetation cover, topography, and landscape visibility. Spatial analyses in RStudio included the reclassification of land use by visual fragility, calculation of cumulative visibility from simulated observation points, and weighting of landscape visual sensitivity. Findings reveal that over 90% of the surface area in each valley has low landscape impact, indicating high suitability for PV development with minimal visual disturbance. Papaloapan exhibits the greatest visual stability, while Perote and Córdoba–Orizaba contain localized critical zones that can be addressed through targeted planning. The open-source, open-data approach ensures high replicability in other regions, offering a robust decision-support tool for siting photovoltaic infrastructure while minimizing visual impacts and promoting landscape integration.

Keywords: solar energy, photovoltaic infrastructure, territorial planning, multicriteria evaluation, Mexico

Introducción

La energía solar ha surgido como la principal fuente de energía renovable en países con alta incidencia de irradiación solar anual. Esta alternativa se destaca por contribuir eficientemente a la generación de energía eléctrica a través de la implementación de sistemas fotovoltaicos. Estos dispositivos transforman eficientemente la luz visible en energía eléctrica a través del efecto fotoeléctrico (Ortega Molina, 2009). Dicha energía es generada desde pequeñas instalaciones residenciales para autoconsumo hasta grandes plantas o parques solares fotovoltaicos (PSF) que abastecen las redes eléctricas nacionales (Iberdrola, 2024).

En el caso de México, se ha mantenido un crecimiento energético sostenidamente acelerado de 2018 a 2023 (Gómez Restrepo & Lancheros Arias, 2025), debido al incremento de 8.131 de la capacidad instalada de electricidad solar fotovoltaica (MW), según las estadísticas presentadas por la *International Renewable Energy Agency* (2024). Esto se atribuye al desarrollo nacional de diversos proyectos gubernamentales, particulares y académicos para la instalación y

mantenimiento de sistemas fotovoltaicos. Los PSF se concentran principalmente en áreas característicamente desérticas de los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Durango, Zacatecas e Hidalgo que, se reconocen por los niveles superiores de irradiación solar (Hernández *et al.*, 1991).

No obstante, la variabilidad solar es crucial para considerar a las zonas del centro del país como idóneas para el desarrollo de cualquier proyecto de energía solar.

Aunque el estado de Veracruz mantiene un amplio potencial solar poco documentado en la literatura científica actual, su extensión territorial y gran diversidad de formas geológicas afectan significativamente la distribución de la irradiación solar. Por ello, los valles fisiográficos se consideran sitios potenciales para un óptimo desarrollo de PSF. Su condición llana minimiza el efecto de la pendiente, al comportarse como un plano horizontal, lo que favorece una captación más uniforme y eficiente de la energía solar (Bautista Carrascosa, 2016).

No obstante, si bien la alta irradiación constituye un criterio técnico fundamental para la planeación de PSF, existen otros criterios geográficos esenciales para evaluar los impactos ambientales asociados (Wüstenhagen *et al.*, 2007). En especial, aquellos que integran la interacción entre paisaje, biodiversidad y percepción territorial en estas unidades fisiográficas, tal como el impacto paisajístico. Esta herramienta relaciona la transformación del paisaje y la alteración visual ante cualquier observador en el sitio del PSF (Chiabrando *et al.*, 2009). Por lo tanto, el modelado de los niveles de impacto paisajístico es ampliamente utilizado para identificar las zonas vulnerables a alteraciones visuales, de extremas a muy bajas, dentro del valle en cuestión (López-Rodríguez, 2025). Bajo esta premisa, el objetivo de este estudio es modelar geoespacialmente el impacto paisajístico de tres valles fisiográficos de Veracruz para contribuir a la planificación de futuros PSF. Con la finalidad de proporcionar a la comunidad científica, gubernamental y público en general una metodología libre con datos abiertos para ser replicada a nivel nacional. Este estudio garantizará una planeación territorial más eficiente en el desarrollo nacional de la tecnología fotovoltaica y permitirá identificar las ubicaciones visualmente óptimas dentro de cualquier área de interés.

Materiales y Métodos

Áreas de estudio

Para este estudio se seleccionaron tres de los valles más representativos de Veracruz: **Perote, Córdoba-Orizaba y Papaloapan**. Cada uno de ellos cuenta con criterios específicos y características geomorfológicas distintivas para ser considerado valle fisiográfico, en función de su cercanía al Eje Volcánico Transversal.

Con el fin de garantizar una representación adecuada de la diversidad paisajística regional, se delimitó una porción significativa dentro de cada valle, priorizando zonas que reflejan variaciones en la cobertura vegetal y visibilidad territorial de las localidades adyacentes. Las dimensiones geográficas de cada área de estudio se presentan en la Tabla 1, donde se especifican los dominios de latitud y longitud, así como una estimación de superficie considerada. Por su parte, en la Figura 1 se muestra la ubicación espacial de dichas áreas.

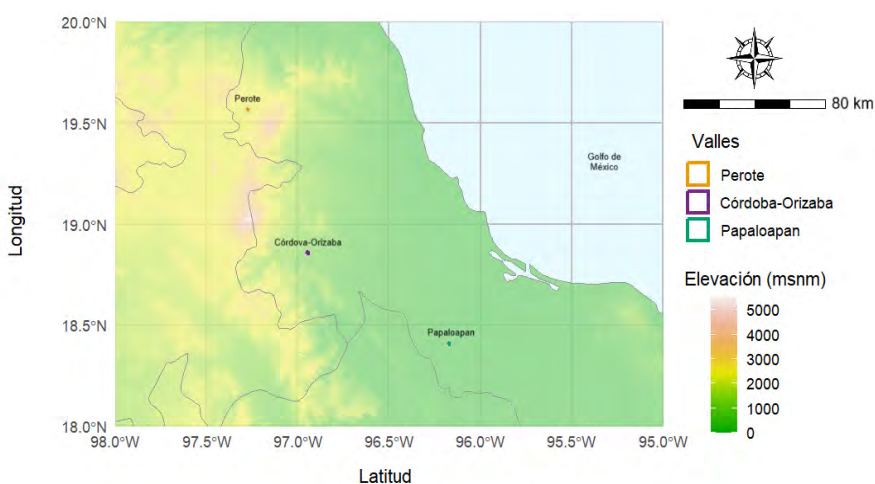


Figura 1. Ubicación geográfica de la delimitación territorial de los valles fisiográficos de Perote, Córdoba-Orizaba y Papaloapan (Elaboración propia)

Tabla 1. Delimitación geográfica de los valles analizados (Elaboración propia)

Valles	Latitud mínima (°)	Latitud máxima (°)	Longitud mínima (°)	Longitud máxima (°)	Área estimada (km ²)
Perote	19.56347	19.57055	-97.27849	-97.27141	6.37
Córdoba-Orizaba	18.85420	18.86000	-96.94939	-96.94359	5.71
Papaloapan	18.40384	18.41085	-96.17738	-96.17038	6.45

Datos geoespaciales

Los datos geoespaciales obligatorios para calcular y modelar el impacto paisajístico son: el Modelo de Elevación Digital (DEM), las estaciones de observación y cobertura de uso de suelo y vegetación.

El DEM se obtuvo con una resolución de 30 metros mediante la paquetería de RStudio llamada “Elevatr”. Esta librería facilita el acceso a datos de elevación tanto puntuales como en formato ráster, provenientes de Amazon Web Services Open Data Terrain Tiles y la API de conjuntos de datos de Open Topography Global (Hollister, 2023).

Las estaciones de observación fueron representadas puntualmente y extraídos de OpenStreetMap (OSM), una plataforma que proporciona datos globales sobre edificaciones, carreteras, vías férreas, senderos, entre otros (OpenStreetMap Foundation, 2024). Estos puntos de interés se implementaron para representar las posibles zonas de percepción dentro de los valles utilizando la librería de RStudio “Osmdata”.

Para el caso de la cobertura de uso de suelo y vegetación, se emplearon los conjuntos vectoriales de las Series V del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), ya que fueron las más recientes, disponibles a escala 1:250 000. Para el valle de Perote se utilizó el Conjunto Nacional Veracruz, clave E14-3 (INEGI, 2020a), mientras que para los valles de Córdoba-Orizaba y Papaloapan se empleó el Conjunto Nacional Orizaba, clave E14-6 (INEGI, 2020b). Dichas cartas fueron procesadas para estimar la fragilidad visual del territorio, es decir estos datos vectoriales fueron categorizados por niveles de fragilidad visual del uso de suelo y vegetación.

Procesamiento espacial

Tabla 2. Reclasificación de uso de suelo y vegetación según su fragilidad visual (Elaboración propia)

Categoría de Fragilidad Visual	ALTA	MEDIA	BAJA
Tipo de Uso de Suelo	BOSQUE DE OYAMEL		
	BOSQUE DE GALERÍA		
	BOSQUE DE TÉSCATE		
	BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA		
	BOSQUE DE PINO		
	BOSQUE DE PINO-ENCINO		
	BOSQUE DE ENCINO	PASTIZAL HALÓFILO	SIN VEGETACIÓN
	BOSQUE DE ENCINO-PINO	PASTIZAL INDUCIDO	APARENTE
	SELVA ALTA PERENNIFOLIA	MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO	NO APLICABLE
	SELVA BAJA CADUCIFOLIA	POPAL	
	SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA		
	SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA		
	VEGETACIÓN DE GALERÍA		
	VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS		
	MANGLAR		
	PRADERA DE ALTA MONTAÑA		

El procesamiento de los datos geospaciales mencionados se realizó completamente en RStudio. Inicialmente, fue necesario reprojectar los conjuntos espaciales a EPSG:4326 para proceder a la validación de las geometrías, asegurando que los objetos espaciales fueran funcionales para ser manipulados correctamente. Posteriormente, se reclasificaron los elementos presentes del uso de suelo y vegetación en 3 valores simbólicos de fragilidad visual: Alta, Media y Baja. La Tabla 2 presenta las categorías asignadas según la capacidad de ocultamiento visual de cada tipo de cobertura, basada en criterios propuestos por diversos autores especializados en evaluación paisajística.

Tabla 3. Ponderación de sensibilidad visual según el tipo de receptor (Elaboración propia)

Tipo de receptor	Sensibilidad Visual	Ponderación
Miradores naturales, zonas ecoturísticas	Muy Alta	5
Áreas residenciales rurales visibles	Alta	4
Caminos panorámicos, senderos elevados	Media	3
Áreas agrícolas con baja densidad visual	Media-baja	2
Infraestructura productiva o industrial	Baja	1
Zonas sin presencia humana o vegetación	Muy baja	0

Modelado del impacto paisajístico

El cálculo del impacto paisajístico se efectuó mediante la multiplicación de las capas de visibilidad acumulada y los valores de sensibilidad visual establecidos en la Tabla 3, según el esquema analítico desarrollado por López-Rodríguez (2025). Así, se adquirió el mapa ráster clasificado en seis niveles propuestos en la Tabla 4, que representan el impacto paisajístico de cada valle.

Tabla 4. Ponderación de los niveles propuestos de impacto paisajístico (Elaboración propia)

Impacto Paisajístico	Ponderación
Extremo	6
Muy Alto	5
Alto	4
Medio	3
Bajo	2
Muy bajo	1

Visualización

La visualización de los mapas finales de fragilidad visual e impacto paisajístico se refinó utilizando los paquetes “Ggplot2” y “Tmap”. Finalmente, se calcularon los porcentajes correspondientes a cada nivel de impacto, con el objetivo de comparar la distribución porcentual del impacto paisajístico entre los tres valles veracruzanos.

En adición, en la sección de ANEXO 1 se incluye el código completo para replicar esta metodología en cualquier área de interés, facilitando su aplicación en procesos de planeación territorial de futuros PSF.

Resultados y Discusión

Estudio de caso 1: Valle de Perote

El Valle de Perote es una región ubicada en el Altiplano Mexicano, entre los estados de Veracruz y Puebla. Esta región se caracteriza por su cercanía al Cofre de Perote y forma parte de la región hidrográfica Balsas (RH18) (SEMARNAT, 2010). La región representativa del Valle de Perote se sitúa a 2380 msnm, donde la cobertura vegetal se compone principalmente por bosque de pino, pastizal inducido, bosque mesófilo de montaña y áreas clasificadas como “no aplicable”. Además, de pequeñas porciones de bosque de oyamel, bosque de pino-encino, matorral desértico rosetófilo

y pradera de alta montaña. Esta composición refleja una heterogeneidad paisajística marcada por ecosistemas de alta montaña, áreas intervenidas y zonas de baja cobertura vegetal. La alta complejidad visual acumulada del valle de Perote enriqueció la estimación de la sensibilidad paisajística para evaluar la fragilidad percibida. Como resultado, en la Figura 2 se presenta la distribución espacial de la fragilidad visual y niveles obtenidos de impacto paisajístico en este valle.

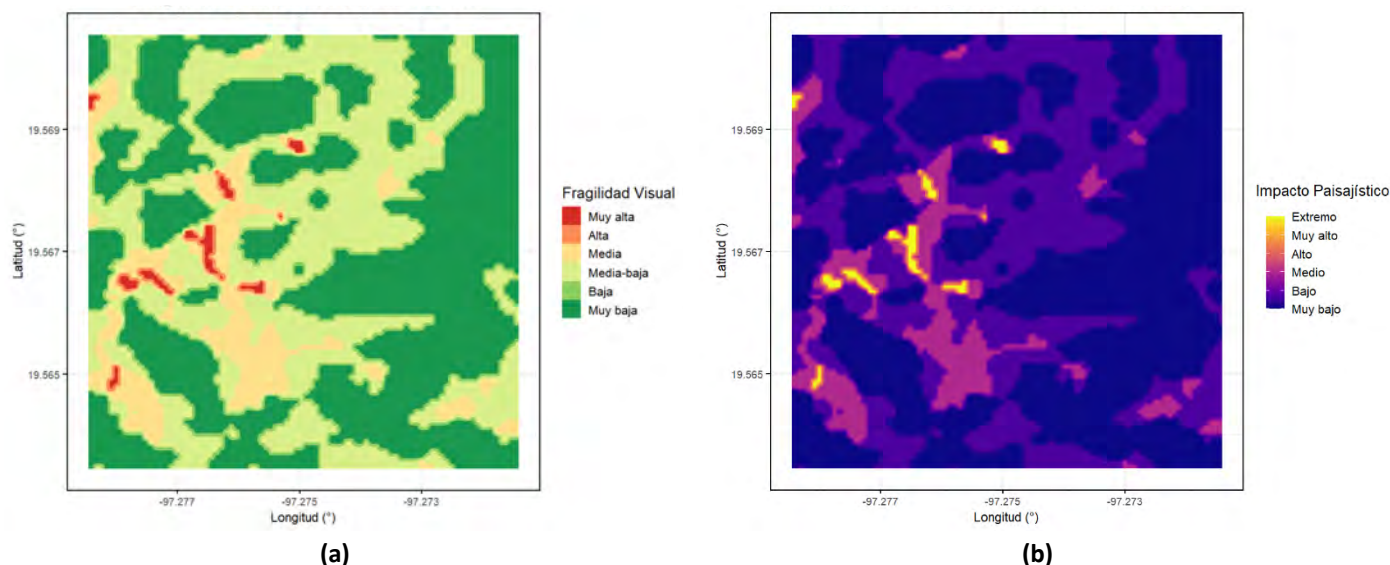


Figura 2. Valle de Perote: (a) Fragilidad Visual e (b) Impacto Paisajístico total (Elaboración propia)

En la Figura 2(a), revela una predominancia de valores medio-bajos a muy bajos de fragilidad visual a lo largo del Valle de Perote, representados por tonalidades verdes. Esto concuerda con la caracterización realizada por Yañez Garrido y Nava-Bringas (2013), quienes describen una vegetación altamente fragmentada debido a presencia de actividades agrícolas.

Las escasas zonas de alta y muy alta vulnerabilidad, indicadas en rojo y naranja, se concentran principalmente hacia el occidente del valle. Esta concentración es atribuible a la proximidad al libramiento de Perote, donde la visibilidad territorial y la cobertura vegetal generan mayor sensibilidad escénica. Del mismo modo, hacia el centro del valle emergen zonas de fragilidad media a muy alta, lo cual es reflejo del incremento de ruido visual generado por los bosques presentes. En general, el extremo norte y el sector oriental mantienen zonas extensas de vulnerabilidad visual baja y muy baja, lo que sugiere una menor exposición perceptual y una cobertura más homogénea. Dichos sitios pueden vincularse a la presencia de actividades agrícolas que, en palabras de Paucar-Velasco (2025), incrementan significativamente la afectación del paisaje más no la fragilidad visual.

Para el caso del impacto paisajístico, Figura 2(b), se mantiene una correlación positiva entre las zonas de fragilidad expuestas en la Figura 2(a) y la acumulación de la visibilidad por los observadores simulados. En otras palabras, las áreas clasificadas con alta y muy alta fragilidad coinciden espacialmente con la distribución espacial del impacto paisajístico extremo.

La Figura 2(b) evidencia que, en el Valle de Perote prevalecen mayormente áreas de impacto paisajístico baja a muy bajo, especialmente en el sector oriental y el extremo norte. Estas extensiones territoriales se posicionan como las óptimas para la instalación de plantas solares, puesto que su baja perturbación visual minimiza el conflicto escénico de los puntos cercanos de observación. Tales como, la estación de autoconsumo diésel GCM, una instalación de mantenimiento de Granjas Carroll y el Colegio de Bachilleres del Estado de Veracruz (COBAEV) número 58.

Las superficies heterogéneas de impacto extremo, formadas principalmente por el contraste del libramiento de Perote y áreas de deforestación ocasionan una fragmentación escénica significativa. De acuerdo con Serrano-Martínez (2016), las redes de carreteras provocan este tipo de segmentaciones en el paisaje. Dichas fragmentaciones comprometen la integración territorial de PSF, principalmente cerca de las carreteras locales y áreas forestales dentro del Valle de Perote.

Estudio de caso 2: Valle de Córdoba-Orizaba

El Valle de Córdoba-Orizaba es una amplia superficie en las faldas del Pico de Orizaba o Citlaltépetl, la montaña más alta de México, que pertenece a la región hidrográfica Papaloapan (RH28) dentro del territorio veracruzano, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2024b). La porción superficial representativa de este valle se encuentra a 820 msnm, cubierta por superficies clasificadas como “no aplicable” y selva alta perennifolia, con fragmentos de bosque mesófilo de montaña y pastizal inducido. La presencia de selva alta perennifolia y bosque mesófilo de montaña señala una heterogeneidad paisajística que refleja una transición bioclimática entre ecosistemas húmedos con temperaturas cálidas y zonas templadas. En términos generales, esta fragmentación ecológica reduce los contrastes escénicos relevantes para el análisis de la fragilidad, al alternarse zonas de vegetación densa con áreas de menor cobertura visual. Esta zona de coexistencia entre estribaciones montañosas y planicies intermedias que dan lugar a regiones de intervención agropecuaria o transformación antrópica, particularmente el pastizal inducido, según Rebollo y Gómez-Sal (2003), se caracteriza por su densidad visual menor debido a su vegetación abierta. Desde una perspectiva territorial, estas variaciones generan brechas para ampliar la posibilidad de implementación de parques solares a lo largo del valle. Para ilustrar esta configuración territorial, en la Figura 3 se presenta el mapa de fragilidad visual e impacto paisajístico identificados en el Valle de Córdoba-Orizaba.

La Figura 3(a), refleja una distribución espacial heterogénea de la fragilidad visual en el Valle de Córdoba-Orizaba; empero predominan los valores bajos a muy bajos. En el sector occidental se forma una franja con alta concentración de estos valores, lo cual denota una menor exposición visual con respecto al entorno de observación. En contraste, las zonas existentes con vulnerabilidad alta y muy alta se agrupan únicamente en ocho núcleos dispersos a lo largo del valle. Los valores máximos se concentran en una región geográfica, en torno a los 18.858° de latitud y -96.945° de longitud, acompañados de una amplia extensión territorial con niveles altos y medios de fragilidad visual en el extremo oriental del valle. En síntesis, la Figura 3(a) evidencia que la morfología paisajística del Valle de Córdoba-Orizaba carece de diversidad, lo que resulta en una mayor homogeneidad que reduce su impacto visual. Estos hallazgos coinciden con la investigación de Quintana Cortina (2024), que demuestra que esta pérdida de orden y diversidad es consecuencia de la fuerte expansión de las superficies de cultivo y urbanización.

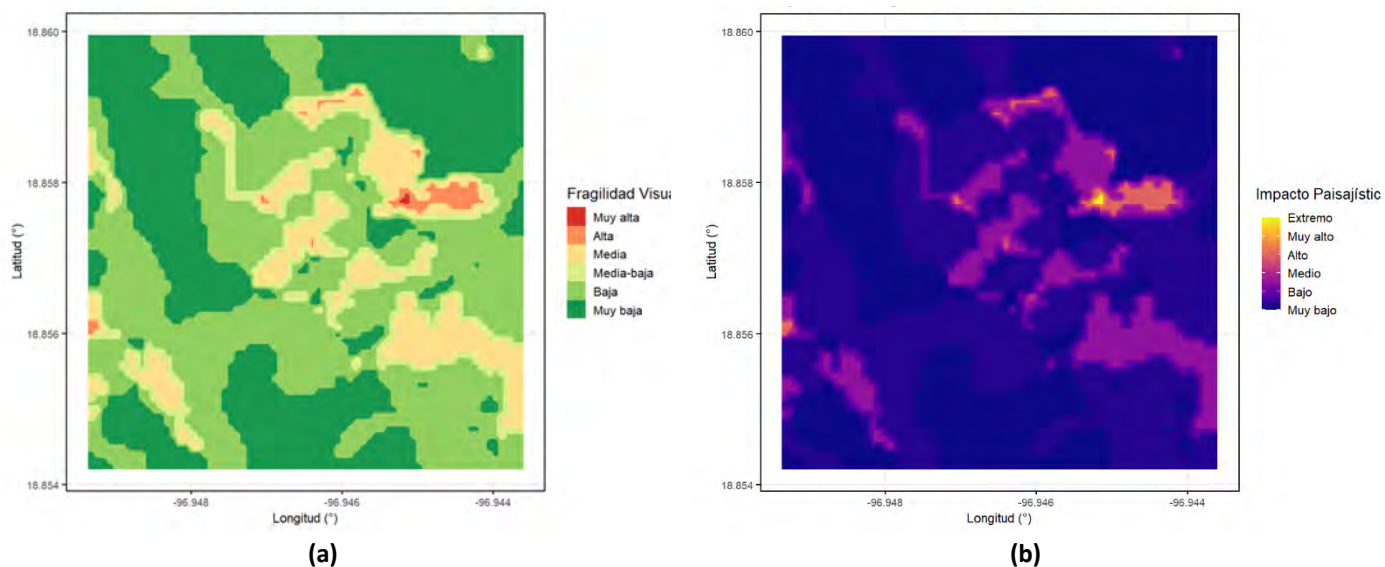


Figura 3. Valle de Córdoba-Orizaba: (a) Fragilidad Visual e (b) Impacto Paisajístico total (Elaboración propia)

El impacto paisajístico generado en el Valle de Córdoba-Orizaba es mínimo, Figura 3(b), ya que prevalecen niveles medios a muy bajos de interacción observacional con respecto a la cobertura vegetal. Aunque la superficie seleccionada se ubica al noreste de puntos clave de observación, como la localidad de San José de Tapía, la visibilidad acumulada permanece sin alteraciones significativas.

La franja territorial de baja fragilidad visual configuró una importante zona extensa de muy bajo impacto paisajístico. Esto la establece como un espacio idóneo para la implementación de tecnología fotovoltaica continua, es decir, con

ausencia de espacios intermedios. Este tipo de diseño en parques solares evita la formación de discontinuidades de gran incidencia paisajística, tal como lo señalan Mérida Rodríguez *et al.* (2010).

Finalmente, las zonas orientales de impacto extremo son equivalentes a la fragilidad escénica. Este hallazgo demuestra que la intervención humana, la apertura del paisaje y la cobertura vegetal intensifican la percepción del cambio visual local en el valle.

Estudio de caso 3: Valle de Papaloapan

El Valle de Papaloapan, se ubica en la provincia Fisiográfica Llanura Costera del Golfo de México, siendo una región que presenta una morfología variada en la que predomina el relieve de superficies planas e inclinadas al oriente, según lo documentado por CONAGUA (2024b). Esta configuración territorial favorece la acumulación de humedad superficial y la formación de paisajes extensos con baja variación altitudinal, lo que influye directamente en la percepción escénica del territorio. Este valle se localiza en la región hidrológica del mismo nombre (RH28) cubierta parcialmente por el Campo Volcánico Los Tuxtlas.

La región representativa del Valle de Papaloapan, situada aproximadamente a 30 msnm, presenta un uso de suelo compuesto principalmente por áreas clasificadas como “no aplicable” y escasas porciones de selva alta perennifolia. Esta composición refleja una transición entre ecosistemas conservados y zonas de intervención antrópica, cuerpos de agua o superficies sin vegetación registrada. El tipo de selva mencionado, por su densidad estructural, representa áreas altamente perceptibles de fragilidad visual. Sin embargo, dichos contrastes entre los diferentes usos de suelo son mínimos, lo que resulta clave para la evaluación del impacto paisajístico en este valle. Esta configuración territorial genera un escenario esperado donde, las áreas aptas para la instalación de infraestructura solar sean abundantes a lo largo del valle. En este contexto, en la Figura 4 se muestra el resultado del modelamiento geoespacial de la fragilidad visual y el impacto paisajístico en el Valle de Papaloapan.

La Figura 4(a) revela patrones de sensibilidad distribuidos de forma irregular, con clara predominancia de zonas de media-baja a muy baja fragilidad visual. La extensión territorial del Valle de Papaloapan posee grandes áreas de interés donde la vulnerabilidad escénica es muy baja, dada la calidad visual de los puntos de observación estratégicos y la mezcla irregular de las coberturas presentes. Esta última condición agrega un valor menor a las extensiones homogéneas mientras que, la diversidad equilibrada de usos de suelo es de mayor calidad visual (Solari & Cazorla, 2019).

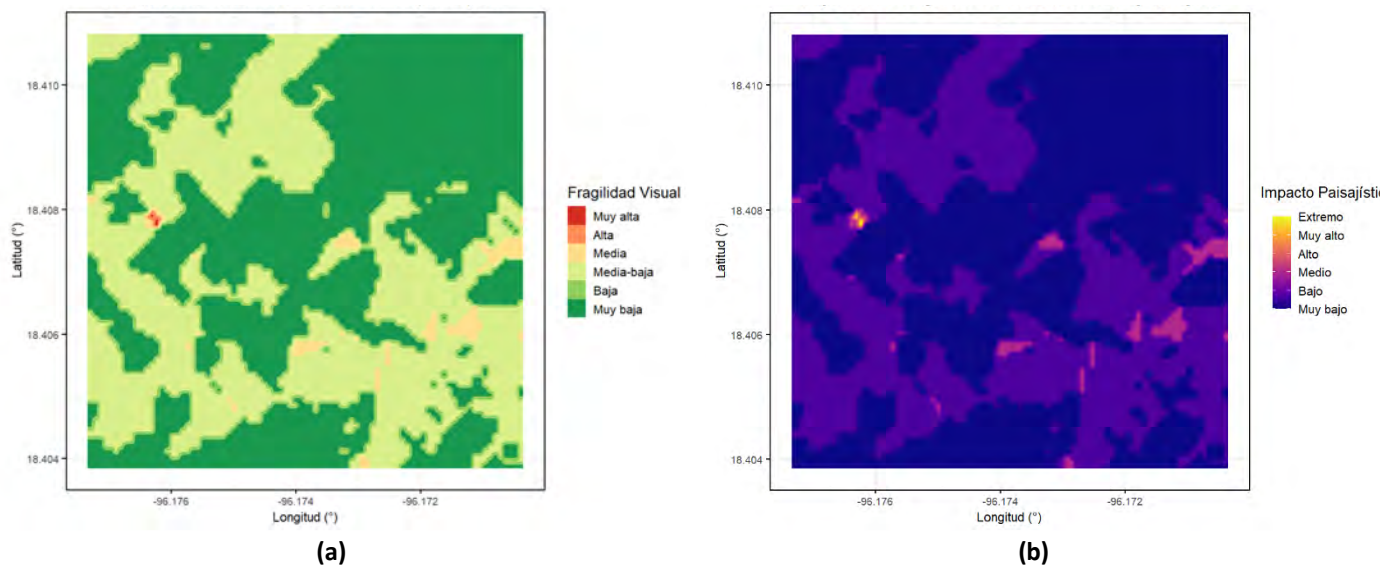


Figura 4. Valle de Papaloapan: (a) Fragilidad Visual e (b) Impacto Paisajístico total (Elaboración propia)

La única área reconocida con muy alta fragilidad se localiza aproximadamente en las coordenadas 18.408° de latitud y -96.176° de longitud. Esta porción es reducida como respuesta a la presencia de los elementos descritos anteriormente.

En suma, la Figura 4(a) refuerza la caracterización del valle como unidad geomorfológica homogénea que conserva una baja complejidad escénica dominada por superficies clasificadas como “no aplicable”.

Por su parte, en la Figura 4(b) se muestra que el impacto paisajístico dentro del Valle de Papaloapan es el más bajo de los tres valles estudiados, conservando los niveles máximos en una zona aislada del sector occidental. Esta mínima intensidad visual se deriva de su lejanía con numerosas comunidades, tales como Santa Lucia, Las Mesillas y Los Naranjos. Estas condiciones resultantes, causadas por el impacto visual, establecen el escenario más propicio para la instalación de PSF en la zona. En este sentido, Sobrini *et al.* (2021) recomiendan el aprovechamiento de las tierras agrícolas y paisajes degradados, como ocurre en la mayoría de los proyectos solares en España, para que la alteración visual sea imperceptible en el entorno evaluado.

Este mapa demuestra que los elementos paisajísticos estables que estructuran al Valle de Papaloapan encapsulan las zonas críticas. Como resultado, en la mayor parte del valle coexisten grandes extensiones territoriales con bajo impacto paisajístico que son altamente preferentes para la localización de PSF. Esto justifica la viabilidad para el desarrollo sustentable con criterios de compatibilidad paisajística.

Comparación entre valles

El estudio del impacto paisajístico en valles fisiográficos es limitado. Por consiguiente, los principales criterios para seleccionar estos territorios como sede de inversión en parques solares son la alta irradiación solar y su homogeneidad escénica. Esta última condición varía con respecto a las condiciones ambientales locales y de la interacción visual que se establece entre el observador y el entorno estudiado.

Los valles veracruzanos, en particular, presentan componentes sensoriales favorables que contribuyen a una baja fragilidad visual y un impacto paisajístico reducido. La Tabla 5 sintetiza los porcentajes correspondientes a cada nivel de valoración, determinados en los mapas individuales de impacto paisajístico total.

Tabla 5. Distribución porcentual total del impacto paisajístico en el Valle de Perote, Valle de Córdoba-Orizaba y Valle de Papaloapan (Elaboración propia)

Impacto Paisajístico	Valle de Perote	Valle de Córdoba-Orizaba	Valle de Papaloapan
Extremo	0.93 %	0.03 %	0.01 %
Muy Alto	0.39 %	0.03 %	0.01 %
Alto	1.24 %	0.88 %	0.08 %
Medio	1.03 %	1.06 %	1.21 %
Bajo	18.42 %	15.44 %	2.61 %
Muy bajo	77.99 %	82.56 %	96.08 %

En términos generales, los tres valles analizados demuestran que más del 90% de su superficie con niveles bajos de impacto paisajístico, resultado de su homogeneidad escénica y predominante baja fragilidad visual.

El Valle de Papaloapan se posiciona como el más estable del conjunto, siendo la mejor opción para el aprovechamiento solar fotovoltaico. Su morfología homogeneizada por la actividad antrópica presenta solamente el 0.02% de zonas críticas. En definitiva, este valle presenta las condiciones altamente favorables para el desarrollo de PSF, siempre que se respeten los núcleos de vegetación conservada y se integren criterios técnicos legales en la planificación territorial.

Por otro lado, el Valle de Perote, aunque ha sido pionero en proyectos de inversión orientados al establecimiento de fuentes de energía renovable, exhibe los niveles más extremos de impacto entre los tres valles. No obstante, conserva un 96.14% de territorio con inferior impacto, manteniéndose como opción viable bajo esquemas de mitigación visual. La distribución espacial heterogénea de estos valores extremos subraya la necesidad de seguir modelando este índice visual.

Finalmente, el Valle de Córdoba-Orizaba muestra un perfil intermedio, posicionándose como el más estable del conjunto. Su configuración paisajística combina zonas de baja fragilidad con la dispersión de espacios geográficos de

mayor sensibilidad. Según los datos en la Tabla 5, únicamente el 0.94% del valle corresponde a zonas de alto impacto, mientras que un el 10.6% se clasifica como de impacto medio y el 98% del territorio prevalecen los niveles bajos de alteración. Para la futura planeación territorial de PSF será necesario estrategias que integren las zonas de bajo impacto con los puntos de observación frecuentes utilizados por las comunidades locales.

Conclusiones

La cartografía resultante de fragilidad visual e impacto paisajístico en los valles estudiados constituye una herramienta esencial para el desarrollo de proyectos solares. Este estudio no solo presenta la primera evaluación de impacto paisajístico en los tres valles fisiográficos clave de Veracruz, sino que también establece un precedente metodológico al utilizar un marco geoespacial de código y datos abiertos. Esta aproximación facilita la evaluación preventiva de infraestructura fotovoltaica en etapas tempranas de planificación, lo cual es una contribución esencial para el ordenamiento territorial a nivel nacional.

Los bajos niveles de impacto paisajístico registrados en los Valles de Perote, Córdoba-Orizaba y Papaloapan demuestran la viabilidad de planificar proyectos fotovoltaicos a gran escala y de diseño continuo. Esta condición permite su integración territorial sin comprometer la calidad visual del entorno y, al mismo tiempo, favorece la aceptación social y ambiental de futuros PSF. Esto es especialmente relevante en regiones caracterizadas por alta biodiversidad y elevado valor escénico.

La metodología utilizada permite planificar eficientemente la instalación de PSF, al integrar criterios técnicos, geográficos y visuales del territorio. Esta aproximación no solo identifica las zonas más idóneas para el desarrollo de proyectos, sino que también contribuye a mitigar el impacto visual y a fortalecer una transición energética más sustentable.

Finalmente, el enfoque geoespacial aplicado demuestra un alto potencial de replicabilidad en otros valles de México, dado que utiliza datos y herramientas abiertas y accesibles. Esta flexibilidad metodológica abre nuevas oportunidades de implementación en escenarios emergentes, fortaleciendo la planeación territorial mediante criterios de compatibilidad paisajística.

Agradecimientos y financiamiento: Este estudio no recibió financiamiento externo. Su desarrollo fue posible gracias al compromiso académico del Centro de Ciencias de la Tierra y de la Facultad de Instrumentación Electrónica de la Universidad Veracruzana.

Bibliografía

- Bautista Carrascosa, B. C. M. (2016). *Radiación extraterrestre sobre una superficie inclinada en función de la latitud, la declinación solar y las características de la pendiente*. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. <https://riunet.upv.es/entities/publication/d1af3a5d-b85e-4c0a-9272-88cb59fde68f>
- Chiabrando, R., Fabrizio, E., & Garnero, G. (2009). *The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: Definition of impacts and assessment of the glare risk*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9), 2441–2451. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.008>
- Comisión Nacional del Agua. (2024a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Río Papaloapan (3019), estado de Veracruz*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, CONAGUA, México. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/veracruz/DR_3019.pdf
- Comisión Nacional del Agua. (2024b). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Orizaba-Córdoba (3007), estado de Veracruz*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, CONAGUA, México. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/veracruz/DR_3007.pdf
- Gómez Restrepo, J. M., & Lancheros Arias, Y. A. (2025). *Evolución de la implementación de energía solar fotovoltaica para los países que conforman la Alianza del Pacífico: Chile, Colombia, México y Perú (2014–2024)*. Repositorio Institucional de la Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia. <https://repositorio.unbosque.edu.co/items/c4833a25-c0af-4e74-9a66-7196f29ff3ef>
- Hernández, E., Tejeda-Martínez, A., & Reyes, S. (1991). *Atlas solar de la República Mexicana*. Universidad Veracruzana y Universidad de Colima, México.
- Hollister, J. (2023). *Access Elevation Data from Various APIs* (versión 0.99.0) [Paquete de R elevatr]. <https://cran.r-project.org/web/packages/elevatr/index.html>
- Iberdrola. (2024). *¿Cómo funcionan las plantas fotovoltaicas?* <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>. Consultado el 10 de junio de 2025.
- International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable energy statistics 2024*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020a). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie V (continuo nacional)*. INEGI, México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825568672>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020b). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie V, estado de Veracruz*. INEGI, México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825568832>
- López-Rodríguez, E. (2025). *Evaluación del impacto paisajístico con QGIS: Metodología y herramientas*. Geoinnova. <https://geoinnova.org/blog-territorio/evaluacion-del-impacto-paisajistico-con-qgis-metodologia-y-herramientas/>. Consultado el 10 de junio de 2025.
- Mérida Rodríguez, M., Lobón Martín, R., & Perles Roselló, M. J. (2010). *Las plantas fotovoltaicas en el paisaje: Tipificación de impactos y directrices de integración paisajística*. Nimbus: Revista de Climatología, Meteorología y Paisaje, 25–26. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/1461>
- OpenStreetMap Foundation. (2024). *¿Qué es OpenStreetMap?* <https://welcome.openstreetmap.org/es/what-is-openstreetmap/>. Consultado el 10 de junio de 2025.
- Ortega Molina, A. L. (2009). *Ahorro de energía eléctrica en viviendas de interés medio: Uso de sistemas fotovoltaicos en la Ciudad de México*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. <https://132.248.9.195/ptd2009/agosto/0646855/Index.html>
- Paucar Velasco, E. G. (2025). *Estudio de las unidades paisajísticas de la parroquia Ignacio Flores: Programa de conservación período 2024*. Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/c5cf481f-1ad1-4d2f-9464-43d10f8b9028>
- Quintana Cortina, A. C. (2024). *Los cambios en la cobertura del suelo y su modelación e impacto en la fragilidad visual de los paisajes del área patrimonial de Viñales, Cuba*. Tesis de maestría, Universidad de La Habana, Cuba. <https://accesoabierto.uh.cu/s/scriptorium/item/2131808>
- Rebollo, S., & Gómez-Sal, A. (2003). *Aprovechamiento sostenible de los pastizales*. Ecosistemas, 12(3), 1–10. <https://www.redalyc.org/pdf/540/54012308.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Atlas del Agua en México*. SEMARNAT, México. https://gisviewer.semarnat.gob.mx/geointegrador/enlace/atlas2010/atlas_agua.pdf
- Serrano-Martínez, M. (2016). *La fragmentación del paisaje causada por la red de carreteras en Navarra: Propuestas de estudio a escala regional desde la ecología del paisaje*. Universidad de Navarra, Pamplona, España. <https://dadun.unav.edu/entities/publication/5ec7b052-293e-4de6-ad3e-02368f28c32e>
- Sobrini, I., Hernando Gallego, A., Legrand, M., Iglesias-Merchan, C., & García-Abril, A. (2021). *Criterios paisajísticos para seleccionar alternativas de localización de plantas fotovoltaicas*. Asociación Española de Dirección e Ingeniería de Proyectos (AEIPRO), España. <https://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2991>
- Solari, F. A., & Cazorla, L. (2019). *Valoración de la calidad y fragilidad visual del paisaje*. Cuadernos del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación, 30. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi30.1519>
- Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. J. (2007). *Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept*. Energy Policy, 35(5), 2683–2691. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>
- Yañez Garrido, G., & Nava-Bringas, M. E. (2013). *Descripción del Valle de Perote*. En C. A. Ochoa Martínez (Coord.), *Valle de Perote: Aspectos bioclimáticos y socioeconómicos* (pp. 29–34). Universidad Veracruzana, México. <https://www.uv.mx/cienti/files/2013/02/Valle-de-Perote-Aspectos-bioclimaticos-y-socioeconomicos.pdf>

ANEXO 1. Script completo para calcular el impacto paisajístico en RStudio para cualquier parte geográfica

#Paso 1: Leer y unir shapefiles de uso de suelo INEGI

```
library(sf)
library(dplyr)

# SUSTITUIR - Ruta a la carpeta
ruta <- "C:/Users/.."

# Lista de archivos .shp que comienzan con "e1403_usv250s5"
archivos <- list.files(path = ruta, pattern = "^e1403_usv250s5.*\\.shp$", full.names = TRUE)

# Leer todos los shapefiles y unirlos en uno solo
uso_sueloPEROTE <- archivos %>%
  lapply(function(x) st_read(x, quiet = TRUE)) %>%
  bind_rows()

# SUSTITUIR - Recorte espacial del uso de suelo según zona de interés EJEMPLO: PEROTE
library(sf)

zona_perote <- st_as_sf(
  st_as_sfc(
    st_bbox(c(xmin = -97.0, xmax = -97.3, ymin = 19.4, ymax = 19.7), crs = st_crs(4326))
  )
)

# Asegurar que ambas capas tengan geometrías válidas
uso_sueloPEROTE <- st_make_valid(uso_sueloPEROTE)
zona_perote <- st_make_valid(zona_perote)

# Transformar CRS para que coincidan
uso_sueloPEROTE <- st_transform(uso_sueloPEROTE, st_crs(zona_perote))

# Recorte espacial con intersección
uso_sueloPEROTE <- st_intersection(uso_sueloPEROTE, zona_perote)
```

#Paso 2: Definir zona de interés y descargar DEM

```
library(elevatr)
library(terra)

# SUSTITUIR - Crear el rectángulo DE LA ZONA DE ESTUDIO
zona_bbox <- st_bbox(c(
  xmin = -97.27849, xmax = -97.27141,
  ymin = 19.56347, ymax = 19.57055
), crs = st_crs(4326))

zona_perote <- st_as_sfc(zona_bbox) |> st_sf()

# Descargar DEM desde elevatr
DEM_raw <- get_elev_raster(locations = zona_perote, z = 13, clip = "locations")
DEM_perote <- rast(DEM_raw)
writeRaster(DEM_perote, "DEM_perote_gdal.tif", overwrite = TRUE)
```

#Paso 3: Obtener puntos desde OpenStreetMap

```
library(osmdata)

# SUSTITUIR - Definir bounding box
bbox_perote <- c(
  min_lon = -97.27849,
  min_lat = 19.56423,
  max_lon = -97.27141,
  max_lat = 19.56979
)

# Crear consulta OSM
consulta <- opq(bbox = bbox_perote) %>%
  add_osm_feature(key = "tourism", value = "viewpoint") %>%
  add_osm_feature(key = "man_made", value = c("tower", "observation_tower"))

# Obtener datos como puntos
puntos_osm <- consulta %>% osmdata_sf()
puntos <- puntos_osm$osm_points

# Transformar CRS al del DEM
puntos <- st_transform(puntos, crs = st_crs(DEM_perote))
```

#Paso 4: Reclasificación de fragilidad visual

```
library(tmap)
```

```
# Definir categorías
alta <- c("BOSQUE DE OYAMEL", "BOSQUE DE ", "BOSQUE DE TÁSCATE",
        "BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA", "BOSQUE DE PINO", "BOSQUE DE PINO-ENCINO",
        "BOSQUE DE ENCINO", "BOSQUE DE ENCINO-PINO", "SELVA ALTA PERENNIFOLIA",
        "SELVA BAJA CADUCIFOLIA", "SELVA ALTA SUBPERENNIFOLIA",
        "SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA", "VEGETACIÓN DE GALERÍA",
        "VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS", "MANGLAR", "PRADERA DE ALTA MONTAÑA")

media <- c("PASTIZAL HALÓFILO", "PASTIZAL INDUCIDO", "MATORRAL DESÉRTICO ROSETÓFILO", "POPAL")
baja <- c("SIN VEGETACIÓN APARENTE", "NO APLICABLE")

# Reclasificar
uso_sueloPEROTE <- uso_sueloPEROTE %>%
  mutate(fragilidad = case_when(
    TIP_VEG %in% alta ~ "Alta",
    TIP_VEG %in% media ~ "Media",
    TIP_VEG %in% baja ~ "Baja",
    TRUE ~ "Desconocida"
  ))

# Visualizar
tm_shape(uso_sueloPEROTE) +
  tm_polygons("fragilidad", palette = c("darkgreen", "gold", "red"), title = "Fragilidad Visual") +
  tm_layout(title = "Fragilidad Visual del Uso de Suelo - Valle de Perote")

#Mostrar el uso de suelo presente
uso_sueloPEROTE %>%
  st_drop_geometry() %>%
  count(TIP_VEG, sort = TRUE)
```

Paso 5: Cálculo del viewshed

```
library(terra)
library(sf)
library(whitebox)
library(tmap)

# SUSTITUIR - Cargar DEM desde archivo local
DEM_perote <- rast("C:/.../DEM_perote_gdal.tif")

# Reproyectar DEM a EPSG:4326 (compatible con Whitebox)
DEM_perote <- project(DEM_perote, "EPSG:4326")

# Guardar DEM reproyectado para Whitebox
writeRaster(DEM_perote, "DEM_perote_wbt.tif", overwrite = TRUE)

# Cargar DEM
dem <- rast("DEM_perote_wbt.tif")

# Generar puntos de observación dentro del DEM
observadores <- spatSample(
  dem,
  size = 3,
  method = "regular",
  as.points = TRUE
)
crs(observadores) <- crs(dem)
writeVector(observadores, "observadores.shp", overwrite = TRUE)

# Ejecutar viewshed con WhiteboxTools
library(whitebox)
wbt_viewshed(
  dem = "DEM_perote_wbt.tif",
  stations = "observadores.shp",
  output = "viewshed_perote_wbt.tif",
  height = 1.7
)

# Cargar resultado del viewshed
viewshed <- rast("viewshed_perote_wbt.tif")
plot(viewshed)
```

Paso 6: Rasterización de fragilidad visual

```
library(sf)
library(terra)
library(dplyr)

# Validar y filtrar geometrías simples
uso_sueloPEROTE_simple <- uso_sueloPEROTE %>%
  st_make_valid() %>%
  filter(st_geometry_type(.) %in% c("POLYGON", "MULTIPOLYGON"))

# Convertir a SpatVector
```

```
uso_vect <- vect(uso_sueloPEROTE_simple)

# Rasterizar fragilidad visual sobre el raster de visibilidad
viewshed <- rast("viewshed_perote_wbt.tif")
raster_fragilidad <- rasterize(uso_vect, viewshed, field = "fragilidad")
```

Paso 7: Interpolación de fragilidad visual

```
library(sf)
library(terra)
library(tmap)
library(cols4all)

# Cargar ráster de visibilidad
viewshed <- rast("viewshed_perote_wbt.tif")

# Crear ráster de mayor resolución para interpolación
res_mas_fina <- rast(
  ext = ext(viewshed),
  resolution = c(0.0000005, 0.000005), # resolución muy fina en grados
  crs = crs(viewshed)
)

# Interpolación bilineal del ráster original
viewshed_interp <- resample(viewshed, res_mas_fina, method = "bilinear")

# Crear matriz de suavizado (3x3 promedio)
matriz_suavizado <- matrix(1, nrow = 3, ncol = 3)

# Aplicar suavizado focal
viewshed_suave <- focal(viewshed_interp, w = matriz_suavizado, fun = mean, na.policy = "omit")

# Normalizar entre 0 y 1
viewshed_norm <- (viewshed_suave - minmax(viewshed_suave)[1]) /
  (minmax(viewshed_suave)[2] - minmax(viewshed_suave)[1])

# Escalar a rango 0 a 5 y redondear
viewshed_05 <- round(viewshed_norm * 5)
```

Paso 8: Visualización de fragilidad visual

```
library(ggplot2)
library(terra)
library(dplyr)

# Convertir raster a data.frame
df_viewshed <- as.data.frame(viewshed_05, xy = TRUE)
colnames(df_viewshed)[3] <- "fragilidad"

# Visualizar el mapa
ggplot(df_viewshed) +
  geom_raster(aes(x = x, y = y, fill = factor(fragilidad))) +
  scale_fill_manual(
    values = rev(cols4all::c4a("brewer.RdYlGn", n = 6)),
    name = "Fragilidad Visual",
    labels = c("Muy alta", "Alta", "Media", "Media-baja", "Baja", "Muy baja")
  ) +
  coord_equal() +
  theme_minimal(base_size = 14) +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 18, face = "bold"),
    legend.position = "right",
    legend.justification = "center",
    panel.border = element_rect(color = "black", fill = NA, size = 1),
    axis.title = element_text(size = 12),
    axis.text = element_text(size = 10),
    axis.ticks = element_line()
  ) +
  labs(
    title = "Fragilidad Visual en el Valle de Perote",
    x = "Longitud (°)", # Coordenadas horizontales
    y = "Latitud (°)" # Coordenadas verticales
  )
```

Paso 9: Visualización de impacto paisajístico

```
# Cargar librerías
library(terra)
library(ggplot2)
library(cols4all)
library(dplyr)

impacto <- viewshed_interp * viewshed_05
```

```
# Suavizar impacto
impacto_suave <- focal(impacto, w = matriz_suavizado, fun = mean, na.policy = "omit")
```

```
# Normalizar impacto entre 0 y 1
impacto_norm <- (impacto_suave - minmax(impacto_suave)[1]) /
  (minmax(impacto_suave)[2] - minmax(impacto_suave)[1])
```

```
# Convertir a data.frame para ggplot
df_impacto <- as.data.frame(impacto_norm, xy = TRUE)
colnames(df_impacto)[3] <- "impacto"
```

```
# Visualizar el mapa
ggplot(df_impacto) +
  geom_raster(aes(x = x, y = y, fill = impacto)) +
  scale_fill_gradientn(
    colours = cols4all::c4a("matplotlib.plasma", n = 100),
    name = "Impacto Paisajístico",
    limits = c(0, 1),
    breaks = seq(0, 1, by = 0.2),
    labels = c("Muy bajo", "Bajo", "Medio", "Alto", "Muy alto", "Extremo")
  ) +
  coord_equal() +
  theme_minimal(base_size = 14) +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 18, face = "bold"),
    legend.position = "right",
    legend.justification = "center",
    panel.border = element_rect(color = "black", fill = NA, size = 1),
    axis.title = element_text(size = 12),
    axis.text = element_text(size = 10),
    axis.ticks = element_line()
  ) +
  labs(
    title = "Impacto Paisajístico en el Valle de Perote",
    x = "Longitud (°)",
    y = "Latitud (°)"
  )
)
```

Paso 10: Calcular el porcentaje de impacto paisajístico

```
# Clasificar en niveles simbólicos
impacto_clasificado <- classify(impacto_norm,
  matrix(c(
    0.00, 0.20, 1, # Muy bajo
    0.20, 0.40, 2, # Bajo
    0.40, 0.60, 3, # Medio
    0.60, 0.80, 4, # Alto
    0.80, 0.95, 5, # Muy alto
    0.95, 1.00, 6 # Extremo
  ), ncol = 3, byrow = TRUE)
)
```

```
# Calcular porcentajes por nivel
valores <- values(impacto_clasificado)
valores_validos <- valores[valores %in% 1:6]
tabla <- table(valores_validos)
porcentajes <- round(100 * tabla / sum(tabla), 2)
```

```
# Crear tabla simbólica
categorias <- c("Muy bajo", "Bajo", "Medio", "Alto", "Muy alto", "Extremo")
```

```
# Asegurar que porcentajes tenga 6 valores, rellenando con 0 si falta alguno
porcentajes_completos <- rep(0, 6)
names(porcentajes_completos) <- 1:6
porcentajes_completos[names(porcentajes)] <- porcentajes
```

```
tabla_impacto <- data.frame(
  Nivel = categorias,
  Porcentaje = porcentajes_completos
)
# Generar texto descriptivo
texto_resumen <- paste0(
  "Distribución porcentual del impacto paisajístico:\n",
  paste0("-", tabla_impacto$Nivel, ": ", tabla_impacto$Porcentaje, "%", collaPSFe = "\n")
)
cat(texto_resumen)
```

Evaluación preliminar del potencial coagulante de *Moringa oleifera* en distintas presentaciones para el tratamiento de aguas residuales de lavandería

Grecia A. Ortega-Hernández, Anderson A. Ramírez-Ramírez, Allan Tejeda y Florentina Zurita *

Centro de Investigaciones en Calidad Ambiental, Centro Universitario de la Ciénega, Universidad de Guadalajara, Avenida Universidad 1115, Ocotlán 47820, Jalisco, México

* Autor de correspondencia: florentina.zurita@academicos.udg.mx

Contaminación de agua, suelo y aire (Tratamiento de aguas residuales)

Recibido: 12 de junio de 2025

Aceptado: 13 de julio de 2025

Publicado: 24 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.503>

Resumen: En este estudio preliminar se evaluó el uso de semillas de *Moringa oleifera* como coagulante natural para el tratamiento de ARL, con el objetivo de determinar el método de preparación más efectivo y la dosis óptima para este tipo de efluente. Se analizaron tres formas de preparación del coagulante: en polvo sin desengrasar, desengrasado y disuelto en solución salina (NaCl 0.250 M al 5 %). Los mejores resultados de remoción de color aparente (CA) y turbidez se obtuvieron con dosis de 1 g/L (78.8 % CA y 83.86 % turbidez), 0.5 g/L (84.35 % CA y 85.16 % turbidez) y 50 mL/L (92.62 % CA y 93.74 % turbidez), respectivamente. Estos resultados indican que la preparación más efectiva fue el coagulante sin desengrasar disuelto en solución salina, al menos para los parámetros evaluados. Los hallazgos demuestran que el coagulante a partir de las semillas de *Moringa oleifera* representa una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales de lavandería. Sin embargo, se requiere profundizar en la eficiencia del proceso para la remoción de otros contaminantes presentes en este efluente, así como el estudio de los factores que afectan su eficiencia.

Palabras clave: aguas residuales de lavandería, *Moringa oleifera*, color, turbidez, coagulación-floculación

Preliminary evaluation of the coagulant potential of *Moringa oleifera* in different forms for the treatment of laundry wastewater

Abstract: In this preliminary study the use of *Moringa oleifera* seeds as a natural coagulant for the treatment of laundry wastewater was evaluated, aiming to identify the most effective preparation method and optimal dosage for this type of effluent. Three preparation methods were analyzed: non-defatted powder, defatted powder, and saline solution (5% in 0.250 M NaCl). The best removal efficiencies for apparent color (AC) and turbidity were achieved with dosages of 1 g/L (78.8% AC and 83.86% turbidity), 0.5 g/L (84.35% AC and 85.16% turbidity), and 50 mL/L (92.62% AC and 93.74% turbidity), respectively. These results indicate that the most effective preparation was the non-defatted coagulant dissolved in saline solution, at least for the parameters evaluated. The findings demonstrate that the coagulant derived from *Moringa oleifera* seeds represents an efficient and sustainable alternative for the treatment of laundry wastewater. However, further investigation is needed into the efficiency of the process for removing other contaminants present in this effluent, as well as a study of the factors that affect its efficiency.

Keywords: laundry wastewater, *Moringa oleifera*, color, turbidity, coagulation-flocculation

Introducción

Las aguas residuales de lavandería (ARL), forman parte de las aguas grises que se generan principalmente en los hogares, además de las empresas dedicadas al lavado de ropa. Se estima que cada ciclo de lavado puede consumir entre 60 y 80 litros de agua (Vishali *et al.*, 2023) que se convierten en aguas residuales. Estas aguas residuales se caracterizan por la presencia de surfactantes, colorantes, grasas y aceites, así como por elevados niveles de sólidos suspendidos, compuestos fosforados y sustancias aromáticas, presentando además un pH básico (Melián *et al.*, 2023; Dadebo *et al.*, 2024). Los surfactantes son los principales aditivos de los detergentes, cuya función es reducir la tensión superficial del agua, permitiendo que la ropa se humedezca con mayor rapidez. No obstante, su baja biodegradabilidad les permite persistir en el medio ambiente durante periodos prolongados, provocando impactos negativos como la acumulación de espuma en cuerpos de agua. Esta acumulación reduce la concentración de oxígeno disuelto, afectando la vida acuática y disminuyendo la capacidad de los ecosistemas para mantener su biodiversidad (Melián *et al.*, 2023; Saravanan *et al.*, 2024).

El tratamiento de las ARL resulta complicado, por lo que se requiere aplicar una combinación de métodos físicos, químicos y biológicos para su adecuada descontaminación. Entre las tecnologías empleadas destacan la filtración mediante membranas (Luogo *et al.*, 2022), la adsorción con carbón activado granular (Nasir & Titah, 2024), el uso de biofiltros (Sinaga *et al.*, 2020), bioreactores (Baihaqi *et al.*, 2022), electrocoagulación (Yaranal *et al.*, 2023), la coagulación-floculación combinada con filtración por membranas (Nascimento *et al.*, 2019) y procesos avanzados de oxidación como el proceso foto-Fenton (Esteban *et al.*, 2021).

Por otra parte, entre los métodos más utilizados para el tratamiento de aguas residuales, especialmente para la eliminación de turbidez, color y sólidos en suspensión, destacan los procesos de coagulación-floculación. Este tratamiento consiste en la desestabilización de las partículas coloidales mediante la adición de coagulantes y la aglomeración de dichas partículas desestabilizadas, dando lugar a la formación de flóculos que, por efecto de la gravedad, sedimentan fácilmente; de esta manera, se generan lodos que pueden ser separados (Desta & Bote, 2021).

Los coagulantes pueden ser de origen inorgánico o natural. Los coagulantes inorgánicos a base de sales de aluminio son ampliamente utilizados debido a su eficacia; sin embargo, se han asociado con problemas neurológicos. Además de sus altos costos, presentan baja biodegradabilidad y generan lodos tóxicos, lo que incrementa significativamente los gastos de tratamiento. En cambio, los coagulantes naturales que provienen de material biológico, generalmente de cáscaras y semillas son amigables con el medio ambiente y en general, son económicos; lo que los hace más apropiados para los países en vías de desarrollo (Nascimento *et al.*, 2019; Desta & Bote, 2021). Algunos ejemplos destacados incluyen la corteza de acacia negra (Nascimento *et al.*, 2019), el quitosano (Vishali *et al.*, 2023), así como diversos residuos biológicos como las cáscaras de granada, cáscaras de Opuntia, residuos de té, bagazo de caña de azúcar y altramuces (Ahmed *et al.*, 2024). También destacan las semillas de yaca (Kitte *et al.*, 2019), las semillas de castaña (Tomasi *et al.*, 2025) y las semillas de *Moringa oleifera* (Zurita *et al.*, 2024).

En este contexto, las semillas de *Moringa oleifera* (SMO) han sido ampliamente estudiadas por su alto potencial como coagulante natural. Este coagulante se clasifica como catiónico, ya que sus moléculas poliméricas presentan una carga positiva neta. Esta característica la hace particularmente eficaz para el tratamiento de aguas residuales (Zurita *et al.*, 2024). Se ha reportado su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domesticas (Ahmed *et al.*, 2024), vinazas tequileras (Zurita *et al.*, 2024), aguas residuales de almazaras (Rifi *et al.*, 2022), entre otros. Respecto a su uso para el tratamiento de ARL, los estudios son limitados. En un estudio realizado por Al-Gheethi *et al.* (2017), se evaluó su desempeño mediante un proceso combinado de aireación y coagulación-floculación. Los resultados mostraron eficiencias de remoción del 82% y 72% para la turbiedad, del 65% y 79% para sólidos suspendidos, y del 26 % y 40 % para la Demanda Química de Oxígeno, utilizando dosis de 120 mg/L y 90 mg/L, respectivamente.

Dado que las ARL presentan elevados niveles de color y turbidez, y considerando la capacidad coagulante de las SMO, resulta relevante evaluar distintas formas de preparación y aplicación del coagulante derivado de estas semillas. Una evaluación comparativa permitirá identificar la presentación más eficiente y establecer la dosis óptima para su uso específico en este tipo de efluente. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar en forma preliminar, el desempeño de diferentes presentaciones del coagulante extraído a partir de SMO para la remoción de contaminantes, específicamente turbidez y color aparente, de ARL.

Materiales y Métodos

El ARL utilizada para cada uno de los experimentos se tomó de las aguas residuales generadas en un domicilio, durante el lavado de prendas de color oscuro. Las muestras de ARL a utilizar se colectaron y se preservaron a 4 °C, hasta su utilización. Para determinar la presentación óptima de las SMO, se evaluaron tres diferentes formas de presentación del coagulante: i) polvo sin desengrasar, ii) polvo desengrasado, y iii) polvo sin desengrasar disuelto al 5% en una solución de NaCl al 0.250 M. Para cada forma de coagulante, la muestra de ARL utilizada fue de diferente lote.

Preparación del coagulante

Para la obtención del coagulante en polvo de SMO se siguió el procedimiento descrito por Zurita *et al.* (2024), el cual se inició con el retiro manual de las cáscaras, seguido por la trituration de las semillas en un mortero de porcelana. Luego, las semillas trituradas se colocaron en un horno de secado (Yamato, Shanghai, China, modelo DVS402) a 55 °C

durante dos horas. Para la obtención del coagulante en polvo sin desengrasar, el material seco se molió y se tamizó utilizando un tamiz de 0.5 mm. Para la obtención del coagulante en polvo desengrasado, se pesaron 10 g de semillas molidas, seguido de un proceso de extracción de aceite utilizando un equipo Soxhlet (Glas-Col, Terre Haute, IN, USA) y n-hexano como disolvente. Este proceso se llevó a cabo durante 4 ciclos de 30 minutos cada uno. Una vez extraído el aceite, el sólido resultante en el cartucho se secó durante 24 horas bajo una campana de extracción. Posteriormente, el material se molió y se tamizó utilizando un tamiz de 0.5 mm. Respecto a la preparación del coagulante disuelto en solución salina, se tomó como referencia el procedimiento descrito por Prasad (2009). Para ello, se preparó una solución de cloruro de sodio (NaCl) 0.250 M, a la cual se le añadió coagulante en polvo sin desengrasar de SMO hasta alcanzar una concentración del 5%. La mezcla se agitó a temperatura ambiente durante 30 minutos utilizando un agitador magnético. Posteriormente, se filtró y la solución resultante del filtrado se empleó como coagulante.

Pruebas de coagulación-floculación

El procedimiento consistió en verter 1 L de agua residual proveniente de lavandería en vasos de precipitados para someterla a una prueba de jarras (modelo Prendo AM-3) a temperatura ambiente. Posteriormente, se añadió de forma simultánea la dosis correspondiente de coagulante en cada vaso. Las pruebas se realizaron siguiendo las condiciones descritas por Zurita *et al.* (2024), las cuales comprenden una agitación rápida a 200 rpm durante 3 minutos, seguida de una agitación lenta a 30 rpm durante 30 minutos, y un tiempo de sedimentación de 60 minutos. No se efectuó ninguna corrección ni ajuste del pH durante el proceso. Para el coagulante en polvo desengrasado y sin desengrasar, las dosis evaluadas fueron 0.1, 0.5, 1, 1.5 y 2 g/L. Con respecto, al coagulante disuelto en solución de NaCl, se realizaron dos pruebas. La primera prueba incluyó concentraciones de 10, 20, 30, 40 y 50 mL/L, mientras que la segunda prueba abarcó concentraciones de 30, 40, 50, 60, 70 y 80 mL/L, con el objeto de abarcar un rango amplio de concentraciones. El objetivo fue evaluar si el porcentaje de remoción aumenta conforme se incrementa la dosis del coagulante. Las concentraciones seleccionadas fueron determinadas y adaptadas con base en estudios previos realizados por Prasad (2009) y Zurita *et al.* (2024).

Parámetros de calidad del agua

Debido a que este es un estudio preliminar, los parámetros analizados en las muestras fueron únicamente color aparente (CA), turbidez, pH y conductividad eléctrica (CE). La determinación de estos parámetros de calidad del agua se realizó conforme a los Métodos Estándar para el Análisis de Agua y Aguas Residuales (APHA, 2005). El porcentaje de remoción de CA y turbidez se calculó empleando la fórmula presentada en la ecuación 1.

$$\text{Porcentaje de remoción} = \frac{\text{Concentración inicial} - \text{Concentración final}}{\text{Concentración inicial}} * 100 \quad (1)$$

Resultados y Discusión

Evaluación de la eficiencia de remoción del coagulante en polvo sin desengrasar

La Figura 1 muestra los porcentajes de eliminación de CA y turbidez para el coagulante en polvo sin desengrasar, utilizando diferentes dosis. El ARL tenía una concentración inicial de 500 mg/L Pt/Co y 120 UNT, respectivamente; así como un pH de 7.34 y CE de 482.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Después del tratamiento, el pH aumentó a 7.53 ± 0.03 en todos los casos, lo que indica que el pH no se ve afectado, lo cual concuerda con lo reportado por Murali *et al.* (2022). El mejor desempeño en la remoción de CA se obtuvo con la dosis de 1 g/L, alcanzando un 78.8% de eliminación. En cuanto a la turbidez, la mayor eficiencia se logró con la dosis de 1.5 g/L, con un 84.33% de remoción, seguida de cerca por la dosis de 1 g/L, con un 83.86%. Estos resultados contrastan con los reportados por Desta & Bote (2021), quienes emplearon coagulante en polvo sin desengrasar en aguas residuales domésticas tanto ácidas como básicas, alcanzando eficiencias de remoción del 98 % para turbidez y del 90.76 % para color en condiciones ácidas, y del 99.5 % y 97.7 %, respectivamente, en condiciones básicas, utilizando una dosis óptima de 0.8 g/L. En comparación, las eficiencias alcanzadas en el presente estudio son menores, lo cual podría explicarse por las diferencias en la concentración inicial y la naturaleza del agua tratada. Las ARL tienden a presentar concentraciones mayores de turbidez y color en comparación de las aguas residuales domésticas, lo que puede requerir dosis más altas. Por otro lado, los resultados obtenidos son consistentes con los obtenidos por Al-Gheethi *et al.* (2017), quienes emplearon polvo de SMO sin desengrasar como coagulante en

ARL con concentraciones iniciales de 57.8-68.1 UNT, logrando una eliminación del 83.63% con una dosis de 1.2 g/L; aunque en el presente estudio, la concentración de turbidez es casi el doble.

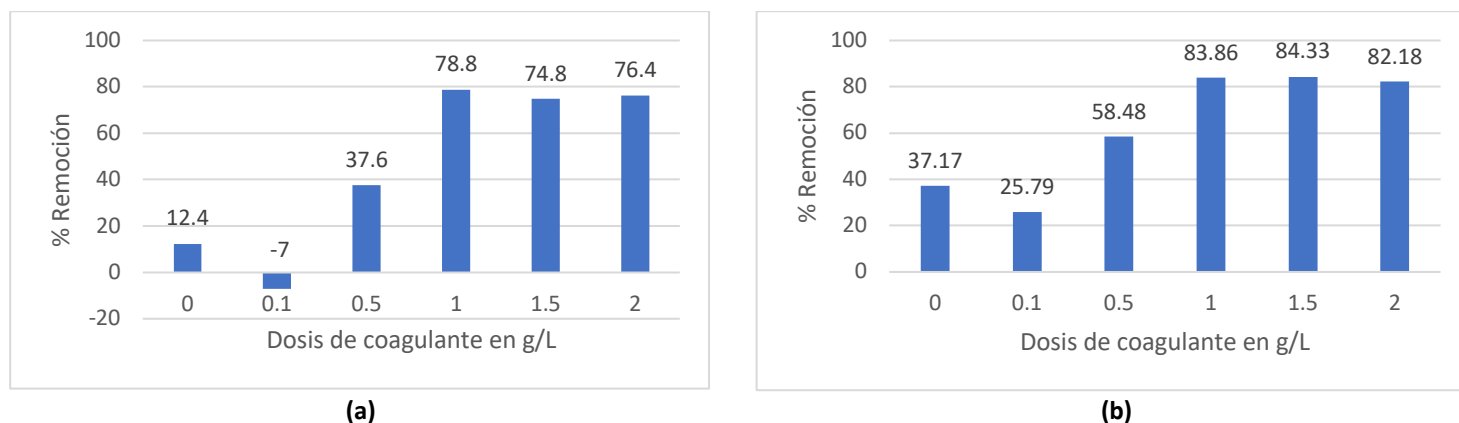


Figura 1. Porcentajes de eliminación de los parámetros evaluados, a) CA y b) turbidez a diferentes dosis del coagulante en polvo sin desengrasar

Evaluación de la eficiencia de remoción del coagulante en polvo desengrasado

Estas pruebas se realizaron con ARL con una concentración inicial de 690 mg/L Pt/Co y 109.016 FTU, respectivamente. Los valores iniciales de pH y de CE, fueron de 7.22 y de 423.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Similar al coagulante sin desengrasar, tras el tratamiento, se observó un ligero incremento en el pH, con un valor promedio de 7.38 ± 0.05 en todos los casos. En este caso, se encontró una eficiencia superior con dosis más bajas (0.5 g/L), alcanzando remociones del 84.35 % para CA y del 85.16 % para la turbidez, como se muestra en la Figura 2. Este comportamiento podría atribuirse, según Mejía *et al.* (2020), a una mayor concentración de la proteína catiónica responsable de la coagulación, la cual se concentra tras la extracción del aceite de la SMO.

Cabe destacar que el aumento en la dosis del coagulante no se tradujo en una mayor eficiencia de remoción; por el contrario, se evidenció un efecto inverso en la claridad del agua. Según Desta & Bote (2021), este fenómeno podría explicarse por la sobresaturación de iones positivos en la solución, ya que la dosis aplicada excede la cantidad de impurezas presentes en la muestra, lo que interfiere con el proceso de coagulación-floculación. Por otro lado, con los resultados reportados por López-Grimau *et al.* (2016), quienes evaluaron el uso de coagulante en polvo desengrasado en aguas residuales domésticas, se observaron remociones del 94.44 % de turbidez, utilizando una dosis de 1.5 g/L. Estos valores difieren de los obtenidos en el presente estudio, lo cual puede atribuirse a la distinta composición de las aguas tratadas, como se mencionó anteriormente.

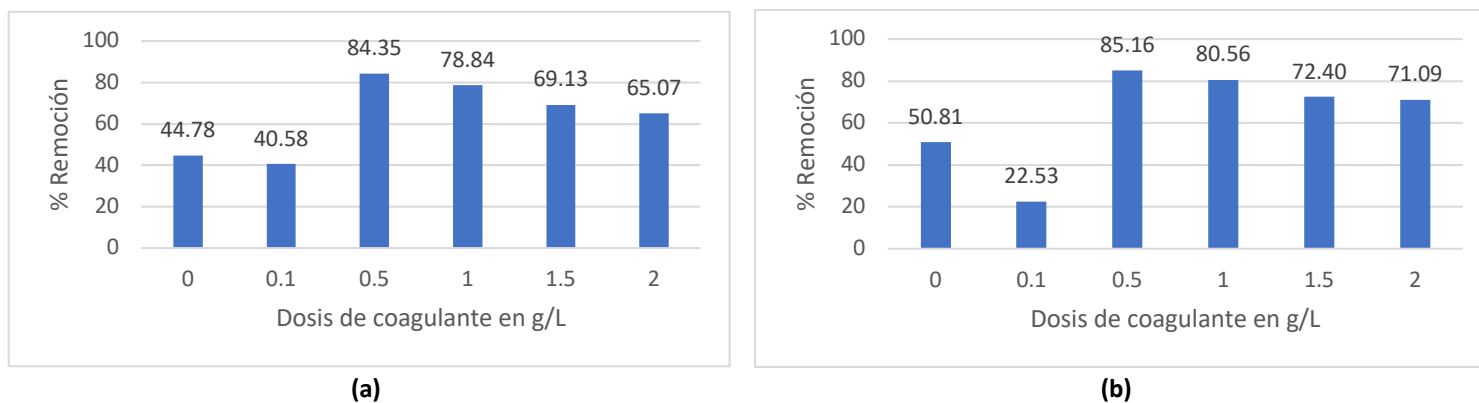


Figura 2. Porcentajes de eliminación de los parámetros evaluados, a) CA y b) turbidez a diferentes dosis del coagulante en polvo desengrasado

Evaluación de la eficiencia de remoción del coagulante en polvo sin desengrasar disuelto en una solución salina

Como se comentó se realizaron dos pruebas con lotes diferentes de ARL. Los resultados se muestran en la figura 3a-d. En la Prueba 1, las concentraciones fueron de 810 mg/L Pt/Co CA y 190 FTU de turbidez y los valores de pH y CE fueron de 7.46 y 846.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Durante el ensayo, el pH se mantuvo constante, mientras que la CE aumentó progresivamente con el incremento en la dosis de coagulante. En la Prueba 2, las condiciones iniciales fueron un pH de 6.37, CE de 606.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, turbidez de 138.83 FTU y CA de 1025 mg/L Pt/Co. Al igual que en la Prueba 1, la CE mostró un incremento conforme aumentaba la dosis del coagulante. Esto podría deberse, según Shan *et al.* (2017), dado que la salinidad es directamente proporcional a la CE, es por ello que al utilizar solución salina como NaCl, este parámetro aumento considerablemente. En ambas pruebas, la dosis que presentó el mayor porcentaje de remoción fue 50 mL/L, como se muestra en la figura 4. En la Prueba 1 se logró una eficiencia del 90.62 % para CA y del 93.74 % para turbidez. En la Prueba 2, las remociones fueron de 89.85 % para CA y 90.05 % para turbidez con esta misma dosis. Estos porcentajes se deben al incremento de la fuerza iónica debido al NaCl, lo que provoca un aumento en la solubilidad del componente activo (Prasad, 2009; Shan *et al.*, 2017; Al-Jadabi *et al.*, 2023). Cabe destacar que, en la Prueba 1, las dosis más bajas (10 y 20 mL/L) provocaron un efecto adverso, incrementando los valores de CA y turbidez en el efluente. Específicamente, se observó un aumento de 151.85 % en CA y 91.81 % en turbidez para la dosis de 10 mL/L, y de 172.84 % en CA y 114.71 % en turbidez para la dosis de 20 mL/L, lo cual podría explicarse por una subdosificación que desestabiliza el sistema coloidal y promueve la dispersión en lugar de la coagulación.

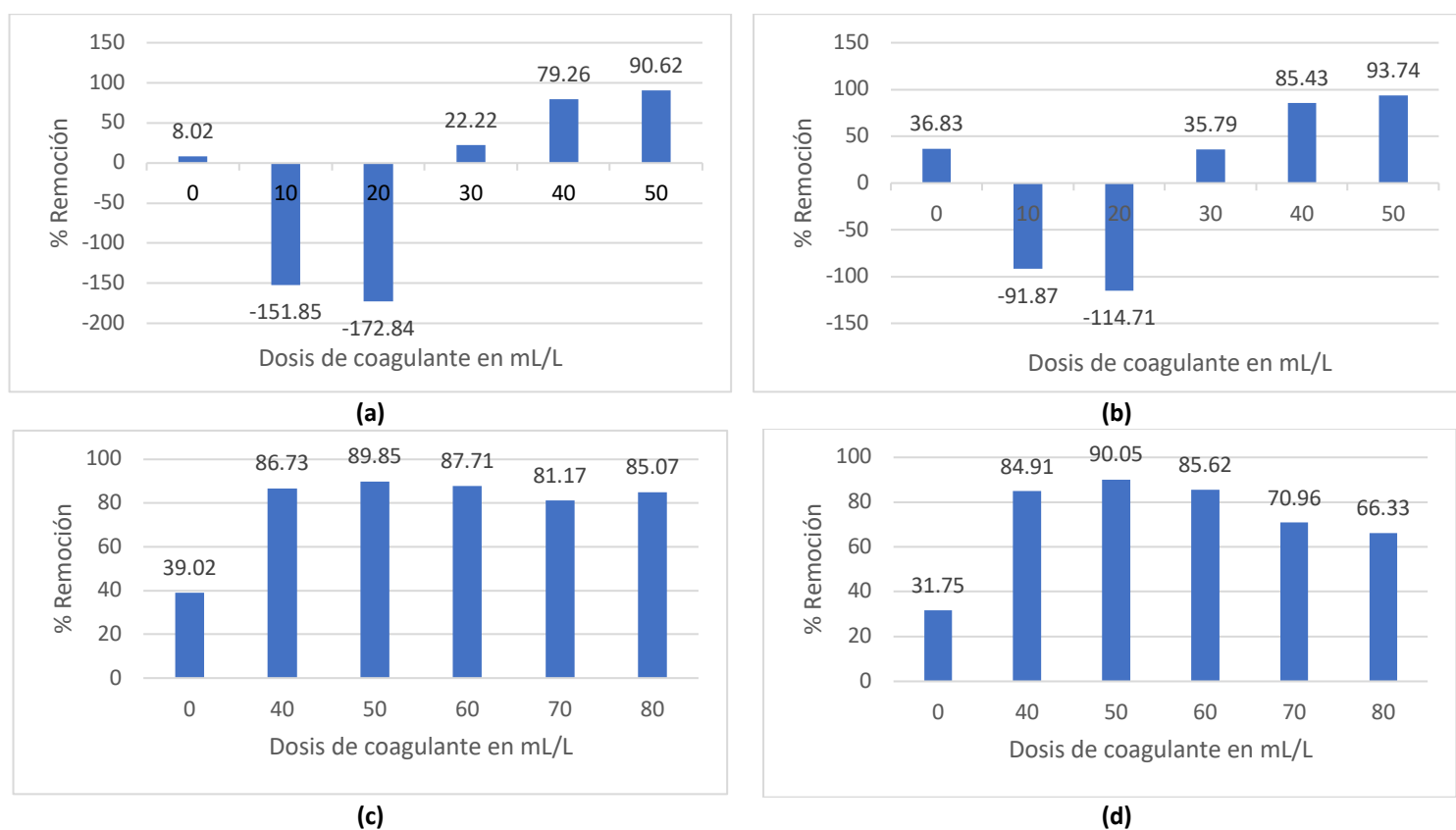


Figura 3. Porcentaje de remoción de CA y turbidez coagulante en polvo sin desengrasar disuelto al 5% en una solución de NaCl 0.250 M. Prueba 1: a) y b), y Prueba 2: c) y d), respectivamente

Es importante remarcar que esta forma del coagulante a partir de la SMO fue la más efectiva para los parámetros de CA y turbidez, lo cual fue muy notorio visualmente; como se puede observar en la figura 4, el ARL prácticamente quedó sin color después del tratamiento en las pruebas de jarras. Por otra parte, los resultados obtenidos con el coagulante disuelto en solución salina, contrasta con lo reportado por López-Grimau *et al.* (2016), quienes aplicaron coagulante a partir de SMO en aguas residuales domésticas con una turbidez inicial de 61.2 UNT, utilizando una dosis de 2 g/L en solución de NaCl 1 M y obtuvieron una remoción de solamente 62 %. Esto podría explicarse por el deficiente desempeño del coagulante en aguas con baja turbidez, como lo señalan Al-Jadabi *et al.* (2023).



Figura 4. Prueba de coagulación-floculación de la Prueba 2

Conclusiones

Este estudio preliminar confirma nuevamente el alto poder coagulante del compuesto activo presente en las semillas de *Moringa oleifera* para el tratamiento de aguas residuales, específicamente para aguas residuales de lavandería. Se identificaron las dosis óptimas para cada una de las formas de preparación evaluadas: 1 g/L para el coagulante en polvo sin desengrasar, 0.5 g/L para el coagulante en polvo desengrasado, y 50 mL/L para el coagulante en polvo disuelto en solución salina de NaCl. Esta última formulación resultó ser la más eficiente, alcanzando remociones de hasta 90.62 % y 89.85 % para el color aparente, y de 93.74 % y 90.05 % para la turbidez en las pruebas realizadas. Sin embargo, se requieren estudios futuros donde se profundice y se incluya la evaluación de otras variables operativas con el objetivo de optimizar aún más la eficiencia del proceso bajo diferentes condiciones experimentales. Asimismo, es necesario investigar la capacidad del coagulante de *Moringa oleifera* para remover otros contaminantes presentes en este tipo de efluentes, a fin de corroborar su aplicabilidad para el tratamiento de aguas residuales de lavandería.

Agradecimientos y financiamiento: La primera autora agradece a la SECIHTI por la beca otorgada para realizar sus estudios de Maestría en Ciencias. Además, los autores agradecen el apoyo de las estudiantes de ingeniería química, Alejandra Díaz Ortega, Andrea Guadalupe Benítez Silva y Martha Isela Navarro Maldonado, durante la realización de los experimentos.

Bibliografía

- Ahmed, H.M., El-Khateeb, M.A., Mohamed, N.Y., Sobhy, N.A., & Fawzy, M. E. (2024). Evaluation of different natural waste materials as bio-coagulants for domestic wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 317, 100034, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137662>.
- Al-Gheethi, A., Mohamed, R., Wurochekke, A., Nurulainee, N., Mas Rahayu, J., & Amir Hashim, M. (2017). Efficiency of *Moringa oleifera* Seeds for Treatment of Laundry Wastewater. *MATEC Web Conf.*, 103, 06001, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710306001>.
- Al-Jadabi, N., Laouan, M., El Hajjaji, S., Mabrouki, J., Benbouzid, M., & Dhiba, D. (2023). The dual performance of *Moringa oleifera* seeds as eco-friendly natural coagulant and as an antimicrobial for wastewater treatment: a review. *Sustainability*, 15(5), 4280, <https://doi.org/10.3390/su15054280>.
- APHA; AWWA; WEF. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (24th ed.). American Public Health Association Wastewater. <https://www.wef.org/publications/publications/books/StandardMethods/>.
- Baihaqi, R. A., Prabandari, K. A., Hariyono, Y., Pratiwi, N. I., Sutanto, H., & Wahyono, Y. (2022). Application of anaerobic and aerobic bioreactors in detergent wastewater treatment: A review. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1098(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1098/1/012034>.
- Dadebo, D., Obura, D., & Atukunda, A. (2024). Phytoremediation of laundry wastewater using *Pistia stratiotes* and recycling of spent plant biomass for sustainable biomethane production. *Bioresource Technology Reports*, 26, 101855, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101855>.
- Desta, W. M., & Bote, M. E. (2021). Wastewater treatment using a natural coagulant (*Moringa oleifera* seeds): optimization through response surface methodology. *Heliyon*, 7(11), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08451>.
- Esteban García, A. B., Szymański, K., Mozia, S., & Sánchez Pérez, J. A. (2021). Treatment of laundry wastewater by solar photo-Fenton process at pilot plant scale. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 8576-8584, <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11151-x>.
- Kitte, S. A., Dressa, S., Endale, H., & Dadi, D. (2019). Removal of anionic surfactant from residential laundry wastewater using jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seeds. *Advances in Environmental Technology*, 5(1), 47-53, <https://doi.org/10.22104/aet.2020.3841.1189>.
- Luogo, B. D. P., Salim, T., Zhang, W., Hartmann, N. B., Malpei, F., & Candelario, V. M. (2022). Reuse of water in laundry applications with micro- and ultrafiltration ceramic membrane. *Membranes*, 12(2), 223, <https://doi.org/10.3390/membranes12020223>.
- López-Grimau, V., Vilaseca, M., & Gutiérrez-Bouzán, C. (2016). Comparison of different wastewater treatments for colour removal of reactive dye baths. *Desalination and water treatment*, 57(6), 2685-2692, <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1031185>.
- Mejía, C., Urquía, C., Cabello, T., & Valdiviezo, G. (2020). Evaluation of *Moringa oleifera* in the water treatment with high turbidity and organic. *Ingeniería del agua*, 24(2), 119-127, <https://doi.org/10.4995/ia.2020.12274>.

- Melián, E. P., Santiago, D. E., León, E., Reboso, J. V., & Herrera-Melián, J. A. (2023). Treatment of laundry wastewater by different processes: Optimization and life cycle assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109302, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109302>.
- Murali, A., Hillstead, K. D., Wrobel, B. S., Thomas, D. J., Gonety, R., & Tarabara, V. V. (2022). Moringa oleifera-derived coagulants for water treatment: Floc structure, residual organics, and performance trade-offs. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 24381-24389, <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19071-8>.
- Nascimento, C. O., Veit, M. T., Palácio, S. M., Gonçalves, G. C., & Fagundes-Klen, M. R. (2019). Combined application of coagulation/flocculation/sedimentation and membrane separation for the treatment of laundry wastewater. *International Journal of Chemical Engineering*, 2019(1), 8324710, <https://doi.org/10.1155/2019/8324710>.
- Nasir, F. N., & Titah, H. S. (2024). The use of granular activated carbon and zeolite as an adsorbent to reduce the concentration of phosphate, chemical oxygen demand and total suspended solid in laundry wastewater. *Journal of Ecological Engineering*, 25(4), 170-183, <https://doi.org/10.12911/22998993/184089>.
- Prasad, R. K. (2009). Color removal from distillery spent wash through coagulation using Moringa oleifera seeds: Use of optimum response surface methodology. *Journal of hazardous materials*, 165(1-3), 804-811, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.068>.
- Rifi, S. K., Souabi, S., El Fels, L., Driouch, A., Nassri, I., Haddaji, C., & Hafidi, M. (2022). Optimization of coagulation process for treatment of olive oil mill wastewater using Moringa oleifera as a natural coagulant, CCD combined with RSM for treatment optimization. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 406-418, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.010>.
- Saravanan, A., Thamarai, P., Deivayanai, V., Karishma, S., Shaji, A., & Yaashikaa, P. (2024). Current strategies on bioremediation of personal care products and detergents: Sustainability and life cycle assessment. *Chemosphere*, 354, 141698, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141698>.
- Shan, T. C., Matar, M. A., Makky, E. A., & Ali, E. N. (2017). The use of Moringa oleifera seed as a natural coagulant for wastewater treatment and heavy metals removal. *Applied Water Science*, 7, 1369-1376, <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0499-8>.
- Sinaga, M., Astuti, S., & Gultom, E. (2020). Degradation of phosphate in laundry waste with biosand filter method. I IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 801(1), 012067. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/801/1/012067>.
- Tomasi, I. T., Ferreira, R. M., Boaventura, R. A., & Botelho, C. M. (2025). Natural coagulants from chestnut shells: A sustainable approach for textile wastewater treatment. *Chemosphere*, 376, 144286, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144286>.
- Vishali, S., Poonguzhali, E., Banerjee, I., George, S. S., & Srinivasan, P. (2023). Purification of domestic laundry wastewater in an integrated treatment system consists of coagulation and ultrafiltration membrane process. *Chemosphere*, 314, 137662, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137662>.
- Yaranal, N. A., Kuchibhotla, S. A., Subbiah, S., & Mohanty, K. (2023). Identification, removal of microplastics and surfactants from laundry wastewater using electrocoagulation method. *Water Emerging Contaminants & Nanoplastics*, 3(1), <https://dx.doi.org/10.20517/wecn.2023.46>.
- Zurita, F., Tejeda, A., Ramirez-Ramirez, A., & Montoya, A. (2024). Integration of Coagulation–flocculation (with Natural Coagulant) to Constructed Wetlands for Color Removal from Tequila Vinasses. *Water*, 16(21), 3151, <https://doi.org/10.3390/w16213151>.

Tratamiento de Aguas Residuales de Servicios Cosméticos en Humedales Artificiales con *Sagittaria Latifolia*

Montserrat Guadalupe Barco-Méndez ¹, Gaspar López-Ocaña ^{1,*}, David Guerrero-Zarate ², Carlos Alberto Torres Balcázar ¹, Melina del Carmen Uribe López ³

¹ Laboratorio de Tecnología del Agua, División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco

² Laboratorio Termodinámica de Fluidos, División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

³ Laboratorio de contaminación acuática y toxicología, División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

* Autor de correspondencia: ocanag17@hotmail.com; Tel: +52 993 193 3824

Contaminación de Agua, Suelo y Tierra (Tratamientos biológicos)

Recibido: 11 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 24 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.492>

Resumen: Los humedales artificiales (HA) se continúan estudiando por sus bondades en la remoción de diferentes contaminantes en diversas aguas residuales industriales incluyendo especies vegetales. En esta investigación se evaluó la especie *Sagittaria latifolia* (cola de golondrina) en la remoción de contaminantes de aguas residuales de servicios cosméticos por medio de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial con dimensiones de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho x 0.5 m de profundidad con tiempos de retención de 7 días y 3.5 días respectivamente. Se evaluaron 4 tratamientos: HAFL-T (humedal artificial de flujo libre testigo), HAFL-SL (humedal artificial de flujo libre con *Sagittaria latifolia*), HAFSS-T (humedal artificial de flujo subsuperficial testigo) y HAFSS-SL (humedal artificial de flujo subsuperficial con *Sagittaria latifolia*). Cada tratamiento se corrió por triplicado, tratando 200 L/día de aguas residuales cosméticas. Se realizó la caracterización de calidad del agua (entrada y salida). La calidad del agua de entrada presentó una turbiedad promedio de 70.8±15.4 UNT, color de 3094.58±49.75 UC y DQO de 1692.4±241.5 mg/L. En los experimentos las eficiencias de remoción más altas se obtuvieron en el HAFL-SL, con un 94% de remoción de turbiedad (de 70.8 UNT a 4.0 UNT), 92.6% de color (de 3094.58 UC a 305.8 UC) y 88.8 % de DQO (de 1692.4 mg/L a 190 mg/L).

Palabras clave: humedales artificiales, contaminantes, *Sagittaria latifolia*, aguas residuales, industria cosmética

Removal of Contaminants from Cosmetic Services Wastewater in Constructed Wetlands with *Sagittaria Latifolia*

Abstract: Constructed wetlands continue to be studied for their effectiveness in removing various contaminants from different types of industrial wastewater, including those containing new compounds. In the present study, the species *Sagittaria latifolia* (commonly known as arrowhead) was evaluated for its capacity to remove contaminants from cosmetic service wastewater using free surface flow and subsurface flow artificial wetlands, each with dimensions of 2.5 m in length x 1.2 m in width x 0.5 m in depth, and hydraulic retention times of 7 days and 3.5 days, respectively. Four treatments were evaluated: HAFL-T (free surface flow artificial wetland control), HAFL-SL (free surface flow artificial wetland with *Sagittaria latifolia*), HAFSS-T (subsurface flow artificial wetland control), and HAFSS-SL (subsurface flow artificial wetland with *Sagittaria latifolia*). Each treatment was run in triplicate, treating 200 L/day of cosmetic wastewater. Water quality characterization was carried out for both the inflow and outflow. The influent water quality showed an average turbidity of 70.8±15.4 NTU, color of 3094.58±49.75 CU, and COD of 1692.4±241.5 mg/L. The highest removal efficiencies were achieved in the HAFL-SL treatment, with 94% turbidity removal (from 70.8 NTU to 4.0 NTU), 92.6% color removal (from 3094.58 CU to 305.8 CU), and 88.8% removal (from 1692.4 mg/L to 190 mg/L).

Keywords: Constructed wetlands, pollutants, *Sagittaria latifolia*, wastewater, cosmetic industry.

Introducción

México durante el 2023 se convirtió en el decimotercer mercado en la industria de servicios cosméticos con un incremento del 11 % respecto al 2020, lo que incrementó el volumen y complejidad de las aguas residuales generadas (Sánchez, 2023). Los servicios cosméticos abarcan una amplia gama de productos depilatorios, maquillajes, tratamientos corporales y capilares (Castro & Ramírez, 2020). Los componentes básicos en los productos cosméticos, como conservantes, emulgentes, bactericidas, antioxidantes y gelificantes generan una alta demanda química de oxígeno (DQO), grasas, aceites, detergentes, compuestos orgánicos volátiles y metales que contribuyen a la toxicidad de estos (Mulford, 2023). Estos se descargan continuamente en ecosistemas acuáticos creando impactos ecológicos relacionados con la bioactividad, la toxicidad y la bioacumulación entre diversas especies biológicas (Rosas *et al.*, 2020).

Frente a este panorama, ha surgido la necesidad de buscar nuevas alternativas para el tratamiento de aguas residuales de bajo costo y requerimientos sencillos en operación y mantenimiento para el mejoramiento continuo en la gestión de los recursos hídricos. Witthayaphirom *et al.* (2020) señalan que los humedales artificiales (HA) han demostrado ser una tecnología eficaz en la eliminación de contaminantes básicos presentes en aguas residuales, estos sistemas imitan los procesos que ocurren en humedales naturales (Nava *et al.*, 2023), a través del cultivo de macrófitas enraizadas (emergentes, flotantes o sumergidas) sobre un medio de soporte (grava, arena u otros) y la presencia de microorganismos en la zona de raíces. Debido a la popularidad de estos sistemas se requiere mayores estudios sobre el potencial de fitorremediación de las especies vegetales nativas (Benny & Chakraborty, 2020).

En el sureste de México, particularmente en Tabasco, existe una gran diversidad de flora de pantanos para ser evaluada en el tratamiento de aguas residuales (Martínez & Meraz, 2023). En el tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética, Najul *et al.* (2024) obtuvo buenos resultados aplicando coagulantes (sulfato de aluminio-20 mg/L) y floculantes (polímeros aniónicos-15 mg/L) obteniendo remociones de DQO del 77% y del 80% por medio de flotación con aire disuelto. Por otro lado, Mulford (2023), reportó eficiencias de remoción entre el 70-90% de turbiedad en el tratamiento con lodos activados con un alto rendimiento en la degradación de materia orgánica. Sin embargo, es válido revisar y proponer pruebas de tratabilidad para verificar si la remoción de contaminantes, metales pesados y toxicidad de este tipo de aguas es exitosa mediante alternativas naturales como los humedales artificiales, donde Valero *et al.* (2020) ha obtenido eficiencias de remoción de fósforo del 78% y de metales pesados como el cromo hasta un 36% en aguas residuales de la industria agrícola utilizando *Phragmites australis* en un sistema horizontal de flujo subsuperficial con un tiempo de retención de 3 días.

La Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), a través de la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL), tiene el compromiso de desarrollar tecnologías que benefician a la sociedad y contribuyan a mitigar el daño ambiental, asegurando que estas sean técnica y económicamente viables, además de sustentables. Los humedales artificiales tienen la capacidad de reducir la turbidez del agua y esta reducción suele relacionarse con una disminución en la carga orgánica reflejada en parámetros como DQO y DBO. En este contexto, la presente investigación está dirigida al estudio de *Sagittaria latifolia*, una especie acuática nativa de Tabasco, pequeña y de fácil manejo y transporte, con el fin de observar cuál es su adaptación e implementación en la fitorremediación de este tipo de aguas residuales.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Este trabajo fue realizado en la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), en el área de planta piloto de Humedales del Laboratorio de Tecnología del agua.

Colecta y siembra de la especie

La colecta de *Sagittaria latifolia* se llevó a cabo en el tiradero a cielo abierto Loma de Caballo ubicado en la Ranchería Lázaro Cárdenas, Centro, Tabasco; 17°59'26" N, 92°58'16" O y 17°59'17" N, 92°58'37" O debido a que es una especie nativa de la región, es capaz de crecer con abundancia y es de fácil transportación. Se procedió a transportarla a la División de Ciencias Biológicas en donde se encuentran las unidades experimentales y fueron sembradas en el medio de soporte (grava de río) a una profundidad de 20 cm a lo largo del humedal artificial.

Creación del agua sintética

Se generó una lista de productos y marcas utilizadas con mayor frecuencia en la ciudad de Villahermosa Tabasco por medio de encuestas a los trabajadores de los salones de belleza. (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de resultados de las encuestas

Servicio	Productos y marcas más utilizadas según la encuesta	
	Productos	Marcas
Tratamiento capilar	Tratamiento revitalizante, ampollitas intensivas y mascarilla capilar	Wella, Kuul, Nefertiti
Manicura	Removedor de cutícula, acetona pura y exfoliante	Xiomarc, Loquay y OPI
Masajes corporales	Aceite de eucalipto y aceite de almendras	Jaloma, Rusens y Cocoa Butter
Decoloración	Peróxido de 20 VOL	Xio mara, Kuul y Anven
Tinte	Tinte	Loquay, Anven y Keractive
Alaciado con Queratina	Queratina Brasileña y acondicionador	Keramax, Keraliss y Kativa
Permanente	Loción neutralizante y loción ondulante	OPI, Nefertiti y Loquay

Con base en lo anterior, se determinaron los productos y cantidades para la preparación de un tanque de 200 L de agua residual sintética de servicios cosméticos (Tabla 2).

Tabla 2. Productos del agua residual sintética de servicios cosméticos

Insumos	Cantidad (ml)
Tratamiento revitalizante de residuos y pH marca NEFERTITI	120
Mascarilla de sistema capilar marca KUUL	90
Removedor de cutícula marca Loquay	80
Crema Alaciante con Keratina marca LISE	120
Revelador en crema (peróxido) marca KUUL	50
Loción neutralizante marca NEFERTITI	80
Loción Ondulante marca NEFERTITI	80
Shampoo matizador marca NEFERTITI	100
Decolorante en polvo para mechas marca ANVE	50
Tinte marca KUUL	50
Ampolleta Intensiva marca N	30
Total	850

Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente aleatorizado de un factor (tratamiento) de cuatro niveles: 1 humedal artificial de flujo libre testigo (HAFL-T), 2 humedal artificial de flujo libre con *S. latifolia* (HAFL-SL), 3 humedal artificial de flujo subsuperficial testigo (HAFSS-T) y 4 humedal artificial de flujo subsuperficial con *S. latifolia* (HAFSS-SL); el experimento se corrió por triplicado (Figura 1), y el efecto planta se consideró sub-factor. Se Analizó como variables dependientes: pH, la temperatura, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), color aparente, turbiedad, oxígeno disuelto (OD) y DQO. Todos los tratamientos fueron alimentados de un mismo afluente de agua residual y mismas condiciones de operación. Cada unidad experimental consistió en HA con dimensiones de 2.5 m de largo x 1.2

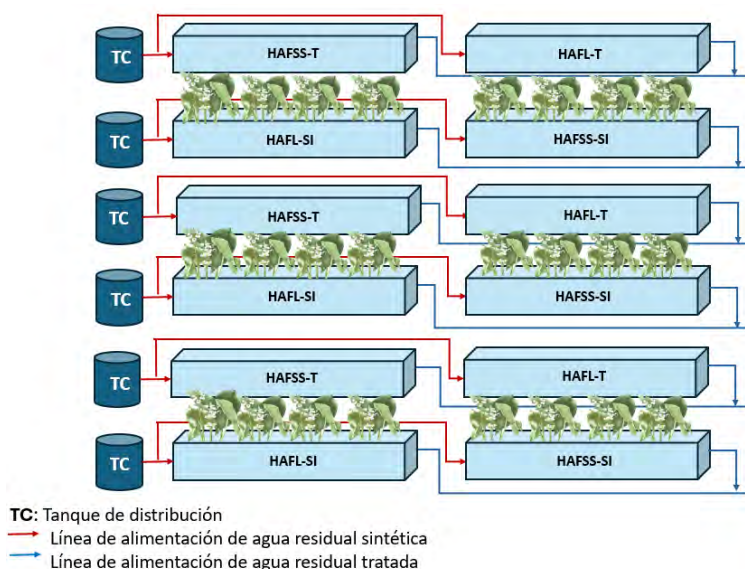


Figura 1. Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales de flujo libre (HAFL) y subsuperficial (HAFSS) con *Sagittaria latifolia* y los humedales testigo con sus réplicas

m de ancho y 0.5 m de profundidad (López *et al.*, 2014). Para datos paramétricos (datos normales y homocedásticos) se procedió a realizar un ANOVA y las pruebas de medias de Fisher para identificar diferencias estadísticas significativas, para los datos no paramétricos se empleó un análisis de Kruskal – Wallis y un contraste de medianas de Mann – Whitney determinando diferencias estadísticamente significativas, todos los análisis estadísticos se realizaron empleando el software STAGRAPHS CENTURION™ v 19.0 con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Caracterización fisicoquímica del agua

Se recolectó una muestra de la entrada y la salida de cada una de las 12 unidades experimentales, tomándose en un recipiente de 1 L. Posteriormente se transportó el agua al Laboratorio de Tecnología del Agua para su correspondiente caracterización resguardándose a una temperatura de 4°C para su conservación. Se determinó la turbidez y color mediante un turbidímetro marca LaMotte modelo TC-3000we Trimeters. Para el pH, temperatura, conductividad (CE) y sólidos disueltos totales (SDT) se utilizó el equipo HI98130 HANNA. Para el oxígeno disuelto (OD) se utilizó el equipo RCYAGO y para el cálculo de DQO se utilizó el equipo HI839150 HANNA.

Se determinaron los siguientes métodos para medir los parámetros: Temperatura (SM 2550), Turbiedad (SM 2130 B), Color (APHA 2120), pH (SM 9040 B), CE (SM 2510 B), SDT (SM 2540), OD (SM 4500-OG) y DQO (USEPA 410.4).

Eficiencia de remoción

La eficiencia de remoción del color aparente y la turbiedad de cada tratamiento se calculó con base a la Ecuación 1 (García *et al.*, 2019).

$$ER(\%) = \frac{C_e - C_s}{C_e} \times 100 \quad (1)$$

Donde:ER=Eficiencia de remoción; C_e =Concentración del contaminante “x” a la entrada (afluente); y C_s =Concentración del contaminante “x” a la salida (efluente)

Resultados y Discusión

Calidad del agua residual en los tratamientos

En la Tabla 3, se presentan los parámetros evaluados de aguas residuales domésticas tratadas por los 4 tratamientos con número de muestras de 15 ($N=15$). El agua residual de servicios cosméticos del tanque de distribución presenta un pH de 8.1 ± 0.2 UpH, temperatura de 27.00 ± 0.6 °C, SDT de 726.7 ± 27.7 mg/L, turbiedad de 70.8 ± 15.4 UNT, color de 3094.58 ± 49.75 UC, OD de 4.1 ± 4.0 mg/L y DQO de 1692.4 ± 241.5 mg/L. Para el caso de la Tabla 4 se muestra la eficiencia de remoción de contaminantes y en el caso de las eficiencias negativas nos indican un aumento en la concentración de salida en ese parámetro, tal es el caso del pH que indica que incrementa de neutro a ligeramente alcalino y para el caso del OD se incrementa la concentración debido a la liberación de oxígeno por las raíces de la especie vegetal.

Tabla 3. Concentración promedio $\pm DE$ de los efluentes de los tratamientos ($N=15$)

Parámetros	HAFL-SL		HAFSS-SL		HAFSS-T		HAFL-T	
	X	$\pm DE$	X	$\pm DE$	X	$\pm DE$	X	$\pm DE$
pH (UpH)	7.1	0.2	7.4	0.2	8.3	0.4	8.4	0.4
Temperatura(°C)	24.3	2.0	26.2	0.8	26.1	1.5	25.9	1.5
CE ($\mu S/cm$)	710.3	27.3	906.0	45.0	798.7	44.7	601.3	29.0
SDT (mg/L)	316.0	19.2	403.3	23.2	362.0	19.0	270.0	10.7
Color (UC)	305.8	210.2	398.3	174.1	338.27	78.40	351.3	91.1
Turbiedad (UNT)	4.0	2.9	8.7	3.1	4.4	1.2	5.5	3.3
OD (mg/L)	1.8	0.2	2.0	0.4	1.6	0.1	2.0	0.4
DQO (mg/L)	190.0	22	190.6	13.8	172.2	27.7	201.6	40.3

Tabla 4. Eficiencias de entrada-salida de los tratamientos evaluados (N=15)

Parámetro	HAFL-SL (%)	HAFSS-SL (%)	HAFSS-T (%)	HAFL-T (%)
pH (UpH)	12.3	9.1	-1.6	-3.8
Temperatura (°C)	10.2	3.1	3.3	4.3
CE (μS/cm)	55.9	43.8	50.5	62.7
SDT (mg/L)	56.5	44.5	50.2	62.8
Color (UC)	92.6	90.4	91.8	91.5
Turbiedad (UNT)	94.4	87.7	93.8	92.2
OD (mg/L)	-12.2	-23.2	0.8	-20.3
DQO (mg/L)	88.8	88.7	89.8	88.1

pH y temperatura

El pH es crucial en el desarrollo de microorganismos, asociados a la degradación de los contaminantes y pueden verse afectados por cambios ácidos o alcalinos (Javier *et al.*, 2024). En el análisis de pH la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor mediano más bajo corresponde al tratamiento HAFSS-SL con $9.14 \pm (9.1, 9.30)$, seguido del tratamiento HAFL-SL con $9.15 \pm (9.02, 9.28)$ y el valor mediano más alto se presenta en el tratamiento HASS-T con $9.32 \pm (9.23, 9.48)$. El agua que ingresa a los humedales artificiales presenta características altamente alcalinas, pero tiende a neutralizarse en los tratamientos al utilizarse *Sagittaria latifolia*, lo que favorece el establecimiento de las bacterias (Rincón, 2023). Los tratamientos cumplen con un rango adecuado para conservar la vida acuática dentro de los cuerpos receptores y se favorecen los procesos de nitrificación y desnitrificación (Giaveno & Gatti, 2022). En cuanto a la temperatura, el análisis de varianza (ANOVA) revela que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El valor más bajo fue el tratamiento HASS-T (22.64 ± 1.32 °C) seguido del HASS-SL (22.8 ± 1.35 °C) y el valor más alto es el HAFL-SL (22.8 ± 1.20 °C). Estas temperaturas son adecuadas para la eliminación de materia orgánica suspendida, ya que influyen positivamente en los procesos microbianos que tienen lugar en los humedales artificiales (Mora *et al.* 2020). Además, promueven el desarrollo de organismos mesófilos, encargados de llevar a cabo funciones biogeoquímicas. La temperatura observada se considera óptima, ya que se mantiene por debajo del umbral de 50 °C, punto en el cual se detienen procesos como la nitrificación bacteriana (Sánchez *et al.*, 2021).

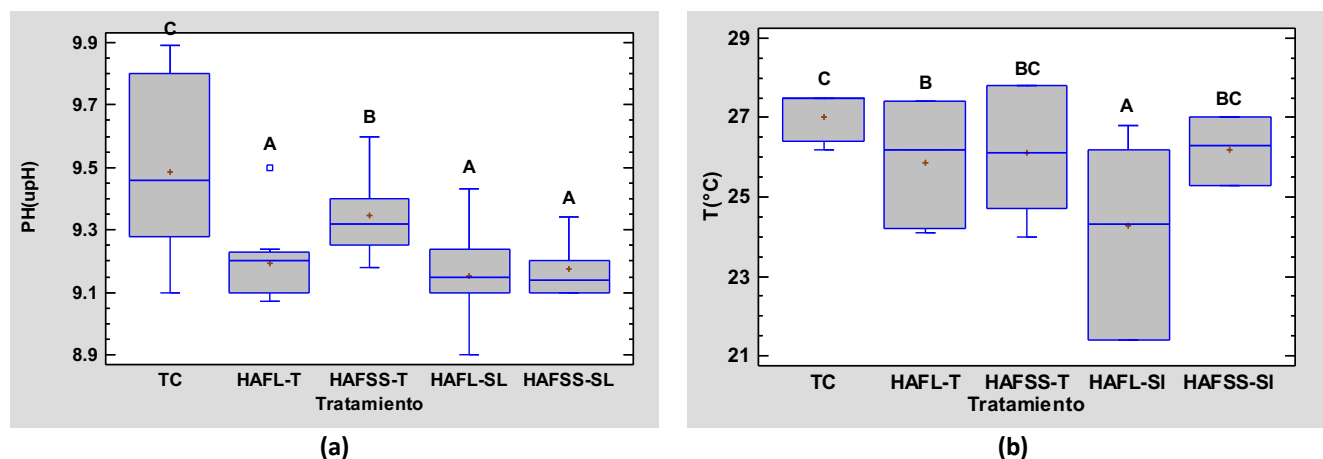


Figura 2. Valores medianos (Q_1 , Q_3) para pH (a) (UpH) y Temperatura (b) (°C) (N=15). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza

SDT y CE

La prueba de Kruskal-Wallis para SDT indica que el valor más bajo se encontró en el tratamiento HAFSS-T con $287.0 \pm (254.85, 300.82)$ mg/L seguido del HAFL-SL con $316.0 \pm (292.71, 376.77)$ mg/L y finalmente el valor más alto es el

tratamiento HAFSS-SL con $452.0 \pm (439.35, 460.82)$ mg/L. Los SDT son el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica, las concentraciones de sólidos disueltos totales en los tratamientos son óptimos en comparación con el rango de referencia (500 mg/L) establecido por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua 1989 para cuerpos receptores. En cuanto a la conductividad eléctrica, permite determinar el contenido de sales disueltas, es proporcional a la concentración de cationes y aniones del medio y esta aumenta con la temperatura (Ituri *et al.*, 2022). El valor más bajo se encontró en el tratamiento HAFSS-T con $574.0 \pm (510.88, 602.287)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ seguido del HAFL-SL con $632.0 \pm (589.53, 753.55)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ y finalmente el valor más alto es el tratamiento HAFSS-SL con $899.0 \pm (877.71, 934.15)$ $\mu\text{S}/\text{cm}$, se alcanzan concentraciones óptimas (>800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) que indica que no hay un efecto fitotóxico para las especies (Muñante *et al.*, 2022).

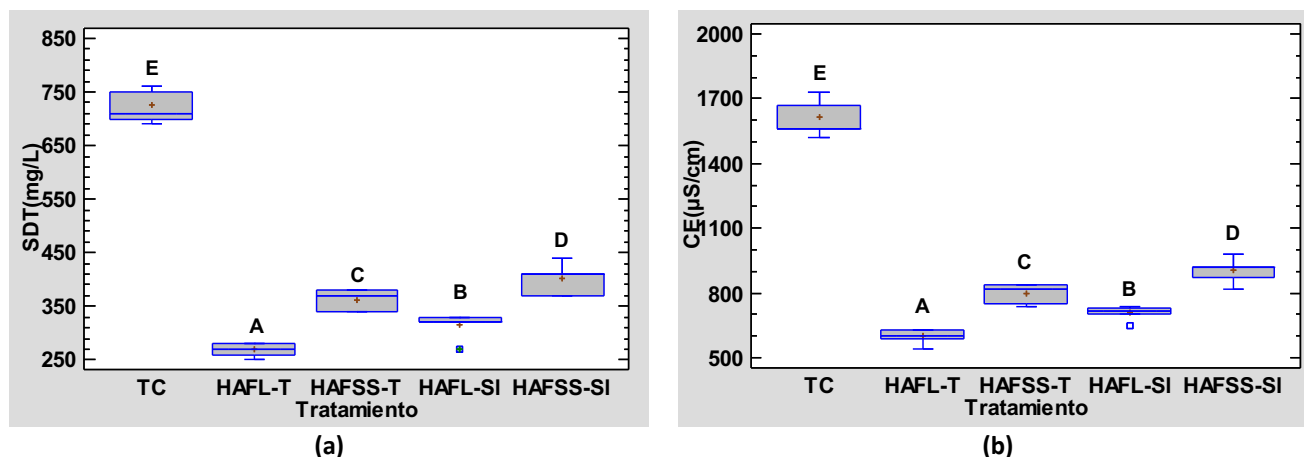


Figura 3. Valores medianos (Q_1 , Q_3) para SDT (a) (mg/L) y CE (b) ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ($N=15$). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza

Turbiedad y color

Para la turbiedad la prueba de Kruskal-Wallis reportó que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95% de confianza. El valor mediano más bajo se encontró en el tratamiento HASS-T con $4.2 \pm (2.52, 10.26)$ UNT, lo cual refleja la capacidad del medio de soporte para filtrar sólidos suspendidos y formar biopelícula (Ernestina, 2024), seguido del HAFL-T con un valor de $4.2 \pm (3.06, 6.01)$ UNT. En contraste, el valor mediano más alto se obtuvo en el HAFSS-SL con $9.3 \pm (4.34, 12.04)$ UNT en donde se observó un aumento debido al crecimiento de algas. La turbiedad es la materia en suspensión y coloidal, finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos; son cofactores de incremento de este parámetro fisicoquímico que se asocia con una menor eliminación de patógenos (Rivera *et al.*, 2021). Las macrófitas no solo mejoran la filtración y el crecimiento microbiano, sino que también facilitan la transferencia de oxígeno a la rizosfera, contribuyendo al ciclo de

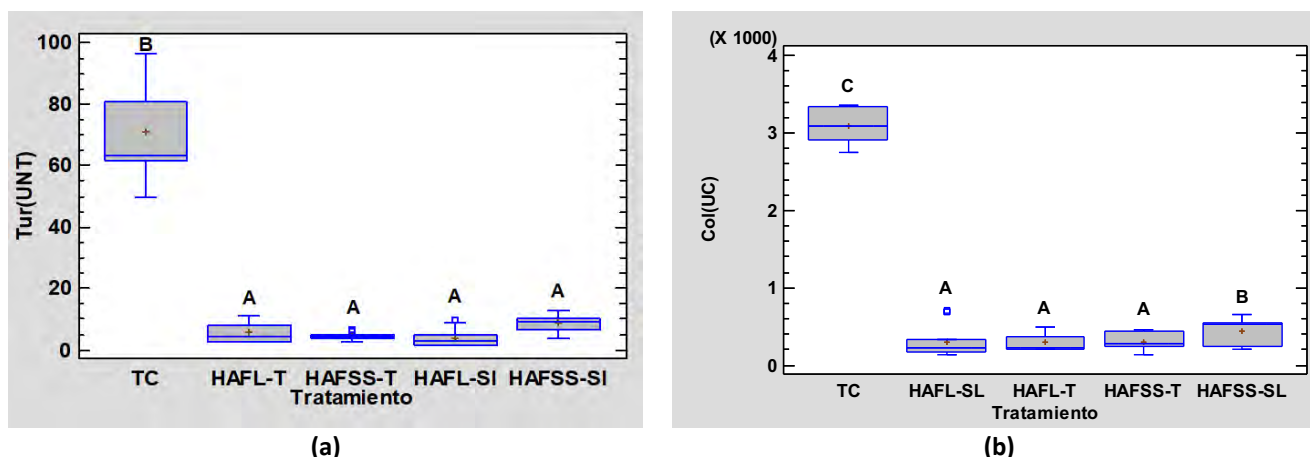


Figura 4. Valores medianos (Q_1 , Q_3) para Turbiedad (a) (UNT) y Color (b) (UC) ($N=15$). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza

nutrientes, la producción de gases y el control de enfermedades (Thomaz, 2021). Los tratamientos se encuentran dentro del rango establecido por Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas Nacionales (CONAGUA, 2024), el cual es de 10 UNT. En cuanto al color, la prueba de Kruskal-Wallis indica que el valor más bajo se encuentra en el tratamiento HAFL-T con $220.0 \pm (207.07, 381.61)$ UC seguido del HAFL-SL con $231.0 \pm (150.88, 635.04)$ UC y finalmente el valor mediano más alto está en el tratamiento HAFSS-SL $531.0 \pm (222.88, 627.54)$ UC con eficiencias del 92% con respecto al agua inicial.

OD y DQO

Para la variable OD el análisis de varianza (ANOVA) indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. El tratamiento con el valor más bajo fue el HAFSS-SL con $2.9 \pm (2.8, 11.83)$ mg/L, seguido del HAFL-SL con $3.4 \pm (2.09, 9.93)$ mg/L y el valor más alto se obtuvo en el HAFL-T con $7.2 \pm (2.12, 7.58)$ mg/L. Finalmente, para la DQO. El valor más bajo fue en el tratamiento HAFL-T con $179 \pm (139.60, 200.75)$ mg/L y el valor más alto se obtuvo en el HAFSS-T con $201.0 \pm (157.81, 256.95)$ mg/L. La DQO es importante para oxidar químicamente los materiales orgánicos e inorgánicos en el agua produciendo la degradación de estos compuestos (Crespo *et al.*, 2024), en este caso se obtuvo una disminución de 172.2 mg/L, es decir se removió el 90% con respecto al agua inicial. En otra investigación realizada por Donoso *et al.* (2024) evaluaron los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal con *Schoenoplectus*, el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea, logrando eficiencias de remoción de DQO de 51.06% con medición a los 15 días.

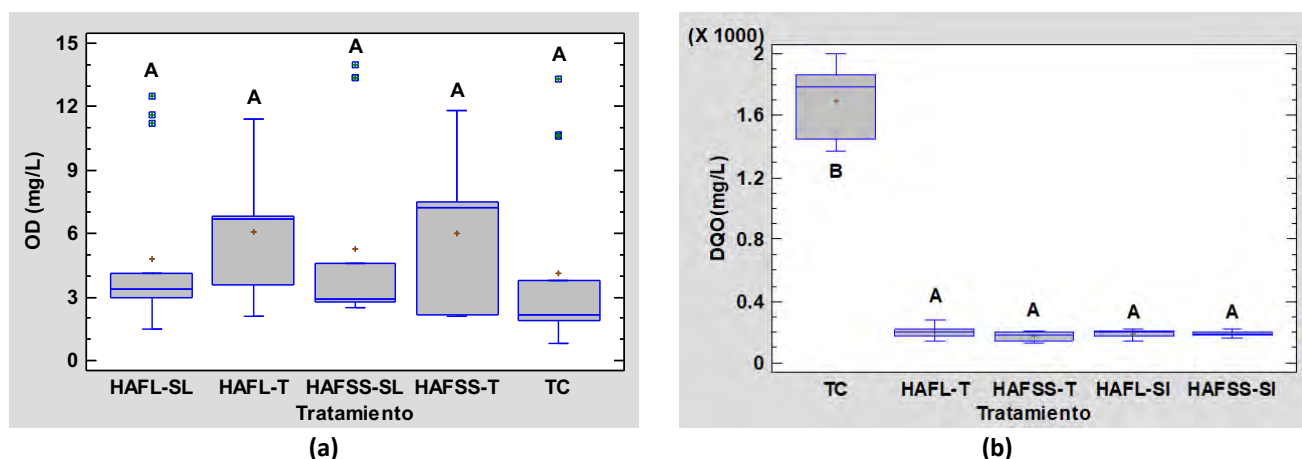


Figura 5. Valores medianos (Q_1 , Q_3) para OD (a) y DQO (b) (mg/L) (N=15). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamiento ($p < 0.05$), al 95 % nivel de confianza

Conclusión

El presente estudio concluye que la especie *Sagittaria latifolia* es factible de implementar y adaptar en la tecnología de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de servicios cosméticos. El uso de una especie nativa y de alta abundancia permite disminuir costos por su disponibilidad y fácil transportación. La comparación de los resultados finales con las características del agua residual cruda evidencia disminuciones considerables de los tratamientos en los parámetros de calidad del agua. El mejor rendimiento fue en el HAFL-SI, con remociones de turbiedad, color y DQO de 94.4%, 92.6% y 88.8% respectivamente. Será importante continuar evaluando el comportamiento del humedal y la especie para verificar si las variaciones de carga, gasto y temperatura ejercen un efecto negativo con este tipo de aguas sobre la especie.

Bibliografía

- Benny, C., & Chakraborty, S. (2020). Continuous removals of phenol, organics, thiocyanate and nitrogen in horizontal subsurface flow constructed wetland. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101099>
- Castro-Silva, A., & Ramirez-Garcia, M. A. (2020). Análisis de la internacionalización del subsector de los cosméticos a partir de la dinámica comercial en Colombia y el caso de éxito de la empresa Belcorp. <https://repositorio.uniagustiniana.edu.co/items/1266d980-0bf2-45e6-b6c8-b9590605efa8>

- CONAGUA. (2024). *Ley Federal de Derechos 2024*. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/ley-federal-de-derechos-2024>
- Crespo, D. M. G., Escobar, L. M. L., & Iñiguez, D. L. R. (2024). Medición de la DQO como parámetro eficaz en el control ambiental en descargas de áreas urbanas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 9399–9417. <https://www.ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/13083>
- Donoso, L. J. G., León, C. E. D., Lazo, J. A. I., & Guamán, E. G. P. (2024). Depuración de aguas residuales de una industria láctea por medio de humedales artificiales de totora. *Polo del Conocimiento*, 9(5), 1005–1019. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/7178>
- Ernestina, C. H. G. (2024, 21 noviembre). Condiciones de operación de un reactor de biopelícula de lecho móvil para mejorar la calidad del agua residual de Celendín – 2023. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/7482>
- Giaveno, A., & Gatti, M. (2022, 1 noviembre). Evaluación de la eficiencia de desnitrificación de un sistema de discos biológicos rotativos (biodiscos) en el tratamiento de efluentes urbanos. <https://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/16907>
- Ituri, A., Zubillaga, M. S., Gutiérrez Boem, F. H., & Álvarez, C. R. (2022). ¿Qué medimos cuando analizamos la conductividad eléctrica de aguas y suelos? *Notas Agrícolas Pampeanas*, 6, 17–22. https://www.agro.unlpam.edu.ar/images/NAP_6%20Septiembre%202022.pdf
- Javier, A. G. F., Lilián, G. B. A., & Samanta, R. G. M. (2024, 1 noviembre). Caracterización de una zona contaminada con arsénico (As) y metales, y aislamiento de hongos con uso potencial en la biorremediación. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/3079>
- López-Ocaña, G., Torres-Balcázar, C. A., Bautista-Margulis, R. G., Hernández-Barajas, J. R., Gutiérrez Vidal, J. J., De la Cruz-Luna, E., & Ferrer-Sánchez, M. I. (2014). Diseño de sistemas experimentales de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial. En W. M. Contreras Sánchez, R. Angulo Pineda & F. Morales Hoil (Eds.), *Perspectiva Científica desde la UIAT* (pp. 133–145). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <http://www.archivos.ujat.mx/2014/divulgacion%20cientifica/SDDC2013final.pdf>
- Martínez, J. M. A., & Meraz, E. D. A. (2023). Estimación de gases de efecto invernadero generados por el tratamiento y descarga de aguas residuales domésticas: Caso de estudio Tabasco. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 7(1), 19–28. <https://revistas.ujat.mx/index.php/JEEOS/article/view/5478>
- Mora, O. C. D. L., Saucedo, T. R. A., González, A. I. J., Gómez, R. S., & Flores, L. H. E. (2020). Efecto de la temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(Supl. 2), 1–17. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.468>
- Mulford, L. J. C. (2023). *Revisión de métodos para el tratamiento de aguas residuales de la industria cosmética* (Trabajo de grado, Fundación Universidad de América). Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9323>
- Muñante Carrillo, K. A., Perca Machaca, D. del R., Nina, R. J., Quispe Sucasaca, J. C., Alarcón Maquera, G. E., & Tirado Rebaza, L. U. M. (2022). Aprovechamiento de estiércol vacuno y pasto seco en la vermiestabilización de lodos residuales de la PTAR Magollo. *Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 20(26), 163–178. <https://doi.org/10.56469/rcti.v20i26.712>
- Najul, M. V., Blanco, H., Mata, A., Alberdi, R., Arcaya, J., Rivero, R., ... & Sucic, G. (2020). Tratabilidad de efluentes líquidos de industrias de cosméticos. *Encuentro Académico Industrial – Jornadas de Investigación*. <https://www.ing.ucv.ve/jifi2018/documentos/ambiente/AIS065.pdf>
- Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. del R., & Reyes-Velázquez, C. (2023). Remoción de contaminantes en los humedales artificiales de flujo subsuperficial: Una revisión. <https://www.redalyc.org/journal/573/57375131046/html/>
- PCC Group. (2025). *Ingredientes cosméticos*. PCC Group Product Portal. <https://www.products.pcc.eu/es/blog/ingredientes-cosmeticos>
- Rincón, A. (2023). *Diseño de humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas y aguas ricas en metales*. Universidad Católica de Manizales. <https://repositorio.ucm.edu.co/entities/publication/16e726c4-6a29-463b-803a-7ea4d076fa07>
- Rivera, M. A. O., Barahona, W. E. C., Costales, J. H. N., Lalvay, X. A. L., & Guachichulca, E. J. R. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del Conocimiento*, 6(3), 228–245. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7926905>
- Rosas, J., Iannacone, J., Rosas, J., & Iannacone, J. (2020). Bioacumulación de elementos potencialmente tóxicos por *Sarcocornia neri* en un humedal costero del Perú. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672020000200343&script=sci_arttext&tlng=en
- Sánchez Esteban, S. (2023). *Análisis de mercado del sector de cosméticos en México*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/63809>
- Sánchez, V. G., Palomino Pastrana, P. A., & Malpartida Yapias, R. J. (2021). Eficiencia de humedales artificiales de totora y berros sobre efluentes de granja porcícola, Perú. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 5(14), 192–203. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i14.110>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022). *NOM-001-SEMARNAT-2021: Límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374
- Valero, J. A. G., Martínez, S. M., Terrero, M. A., Cano, Á. F., Díaz, M. M., Garrido, M. G., & Avilés, J. A. A. (2020). Fitorremediación de aguas residuales industriales mediante humedales artificiales para uso agrícola. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8145329>
- Witthayaphirom, C., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., Ogata, Y., Ebie, Y., & Ishigaki, T. (2020). Organic micro-pollutant removals from landfill leachate in horizontal subsurface flow constructed wetland operated in the tropical climate. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101581. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101581>
- Zamora-Castro, S. A., Marín-Muñoz, J. L., Sandoval, L., Vidal-Álvarez, M., & Carrión-Delgado, J. M. (2019). Effect of ornamental plants, seasonality, and filter media material in fill-and-drain constructed wetlands treating rural community wastewater. *Sustainability (Switzerland)*, 11(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su11082350>

Remoción de contaminantes de efluentes agrícolas vía humedales artificiales

Nancy Estrada-Pérez ¹, Gaspar López-Ocaña ^{1,*}, Randy Adams-Schroeder ², David Guerrero-Zarate ³, Verónica Isidra Domínguez-Rodríguez ²

¹ Laboratorio de Tec. Del Agua, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, México

² Laboratorio de Remediación, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, México

³ Laboratorio de Termodinámica de fluidos, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Jalpa de Méndez, Tabasco, México

* Autor de correspondencia: ocanagl77@hotmail.com

Desarrollo Sustentable (Humedales Artificiales)

Recibido: 9 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 30 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.488>

Resumen: Las aguas residuales agrícolas causan la degradación de cuerpos de agua y suelos, limitando los saneamientos de estas y son descargadas sin tratamiento previo. Los humedales artificiales son una alternativa pues fijan contaminantes en la superficie del sustrato transformando estos por medio de microorganismos logrando niveles de tratamiento óptimos con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento. Con el objetivo de remover nitrato, fósforo y Demanda Química de Oxígeno (DQO), se trató un afluente agrícola con concentraciones iniciales de 13.4 mg/L de nitrato, 73 mg/L de fósforo y 4418.8 mg/L de DQO. Se evaluaron tres humedales artificiales de flujo subsuperficial en el tratamiento de efluentes de un sector agrícola en Centro, Tabasco, con 3.6 días de tiempo de retención y 0.5 m de tirante con grava de ¾ de pulgada. El primer humedal artificial de flujo subsuperficial con *Ludwigia octovalvis* (HAFSL0), el segundo con *Canna indica* (HAFSCI) y el tercer humedal testigo (HAFST), teniendo como resultados para el HAFSL0 un 20.48% de remoción de nitrato, un 73.94% de fósforo y un 98.09% de DQO, para el HAFSCI se removió un 43.58% de nitrato, un 81.99% de fósforo y un 98.44% de DQO y para el HAFST se obtuvo un 52.51% de remoción de nitrato, un 50.58% de fósforo y 98.99% de DQO. Con base en los resultados obtenidos los humedales artificiales con especies nativas de la región son una opción viable para el tratamiento de aguas de esta índole.

Palabras clave: DQO, Efluentes agrícolas, Eficiencia de remoción, Fósforo, Nitrato

Removal of pollutants from agricultural effluents via constructec wetlands

Abstract: Agricultural wastewater causes the degradation of water bodies and soils, limiting their sanitation and is discharged without prior treatment. Constructed wetlands are an alternative because they fix pollutants on the surface of the substrate, transforming them by means of microorganisms, achieving optimal treatment levels with low energy consumption and little maintenance. In order to remove nitrate, phosphorus and chemical oxygen demand (COD), an agricultural effluent was treated with initial concentrations of 13.4 mg/L of nitrate, 73 mg/L of phosphorus and 4418.8 mg/L of COD. Three subsurface flow constructed wetlands were evaluated in the treatment of effluents from an agricultural sector in Centro, Tabasco, with 3.6 days of retention time and 0.5 m of ¾ inch gravel. The first artificial subsurface flow wetland with *Ludwigia octovalvis* (HAFSL0), the second with *Canna indica* (HAFSCI) and the third control wetland (HAFST), with results for HAFSL0 of 20.48% nitrate removal, 73.94% of phosphorus and 98.09% of COD, 43.58% of nitrate, 81.99% of phosphorus and 98.44% of COD were removed for HAFSCI and 52.51% of nitrate, 50.58% of phosphorus and 98.99% of COD were removed for HAFST. Based on the results obtained, constructec wetlands with species native to the region are a viable option for the treatment of this type of water.

Key words: COD, Agricultural effluents, Removal efficiency, Phosphorus, Nitrate.

Introducción

El crecimiento acelerado de la población ha causado el crecimiento de las zonas de cultivos, agravando la situación por el manejo inapropiado de residuos, refiriéndose a las descargas de agua residual de origen industrial, urbano y agrícola siendo la principal causa de la degradación de la calidad de los diferentes cuerpos de agua, en ocasiones por las limitaciones de saneamientos de estas (De Jesús Velázquez-Chávez *et al.*, 2022), el tratamiento de aguas residuales es necesario, pero no suficiente para su saneamiento el cual adquiere importancia para asegurar su recolección, conducción, tratamiento y adecuada disposición en los cuerpos receptores, en condiciones que no perjudiquen al medio ambiente y salud de la población. Los recursos hídricos en México se encuentran bajo una creciente presión debido al crecimiento demográfico, la urbanización y el incremento en el consumo de agua en los hogares y en los diversos componentes del sector productivo, principalmente en la industria y en la agricultura (Cáñez-Cota, 2021).

En la agricultura, la implementación de productos de origen químicos para el control de plagas se ha convertido en parte integral de la vida moderna a nivel mundial, su uso constante presenta consecuencias adversas sobre los humanos y el medio ambiente, principalmente dañando el suelo y los cuerpos de aguas cercanos debido a las escorrentías (Beceyro, 2021). Los plaguicidas y metales pesados son hoy en día una de las perturbaciones más peligrosas para los ecosistemas acuáticos en el mundo, teniendo en cuenta que son elementos biodegradables los cuales tienden a bioacumularse en los tejidos de especies animales y vegetales acuáticos, logrando permanecer en ellos por largos períodos (Fuerte-Velázquez *et al.*, 2022).

Esto puede provocar procesos de biomagnificación y acciones toxicodinámicas al nivel de material biológico que pueden llegar a generar alteraciones metabólicas, mutaciones y anatómicas en las especies animales, incluido el hombre. De acuerdo con sus características y con las del entorno, los contaminantes químicos pueden residir por períodos cortos o largos en los ambientes dulceacuícolas y marinos, lo cual incidirá en su distribución e interacción con el medio (Jáquez-Matas *et al.*, 2022). La difícil degradación de contaminantes en aguas ha sido considerada como un punto estratégico para el desarrollo sustentable de los países, en la actualidad se ha visto grandes avances en materia de tratamiento de aguas residuales industriales y agrícolas, existen tecnologías ejemplo de estas los humedales artificiales (Bertullo, 2020).

Los humedales artificiales se han llegado a utilizar como una tecnología verde que surge de la necesidad de replicar los beneficios ecosistémicos de los humedales naturales para tratar diversos afluentes de aguas residuales, (Becerra *et al.*, 2024), los humedales comprenden tres funcionamientos elementales que les permite un alto potencial para el tratamiento de aguas residuales: establecen físicamente los contaminantes a la superficie del suelo y la materia orgánica, con ayuda de los microorganismos utilizan y llegan a transformar los elementos, logrando así un tratamiento con bajos costos energéticos y de fácil mantenimiento (Delvalle-Borrero *et al.*, 2022).

El siguiente trabajo tiene como objetivo evaluar la remoción de nitrato, fósforo y DQO en humedales artificiales contribuyendo así con la aplicación de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales.

Material y Métodos

Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco específicamente en la planta piloto del Laboratorio de Tecnología del Agua, en donde evaluaron los efluentes del sector agrícola para su posterior tratamiento con humedales artificiales; el sistema de tratamiento está compuesto por 2 elementos principales como se muestra en la Figura 1: tanque de distribución (abastecimiento de agua residual provenientes del sector agrícola) y unidades experimentales, humedales artificiales de flujo subsuperficial con *Canna indica* (HAFSCi), humedales artificiales de flujo subsuperficial con *Ludwigia octovalvis* (HAFSLo) y humedales artificiales de flujo subsuperficial testigo (HAFST). Cada unidad experimental cuenta con alimentación y drenaje propio, con un gasto continuo de 200 L/día de agua residual.

Diseño y construcción

Se utilizaron nueve unidades experimentales de humedales artificiales (HA) de flujo subsuperficial con un dimensionamiento de 2.5 m de largo x 1.2 m de ancho x 1 m de alto con tirante operativo de 0.5 m, el material utilizado para su construcción fue lamina de acero calibre 10, cubierto con un esmalte anticorrosivo y un impermeabilizante elastómero con tres capas de membrana reforzada en la parte interior y exterior; los humedales tiene 0.5 m de grava con rango de tamaño entre 2.36 y 19 mm funcionando como soporte para las especies. Cada HA fue equipado con tuberías de PVC hidráulico de 1" para poder distribuir el flujo de agua proveniente de los tanques de distribución con capacidad de 200 L hacia los tratamientos, el caudal de diseño por HA es de 0.2 m³/día, con el objetivo de lograr una eficiencia de remoción de 92% de DBO₅ (Magaña *et al.*, 2022), de los nueve HA tres HA no contiene especies siendo este le humedal artificial de flujo subsuperficial testigo (HAFST), tres HA sembrada la especie *Ludwigia octovalvis* (HAFSLo) y tres HA sembrada la especie *Canna indica* (HAFSCi)

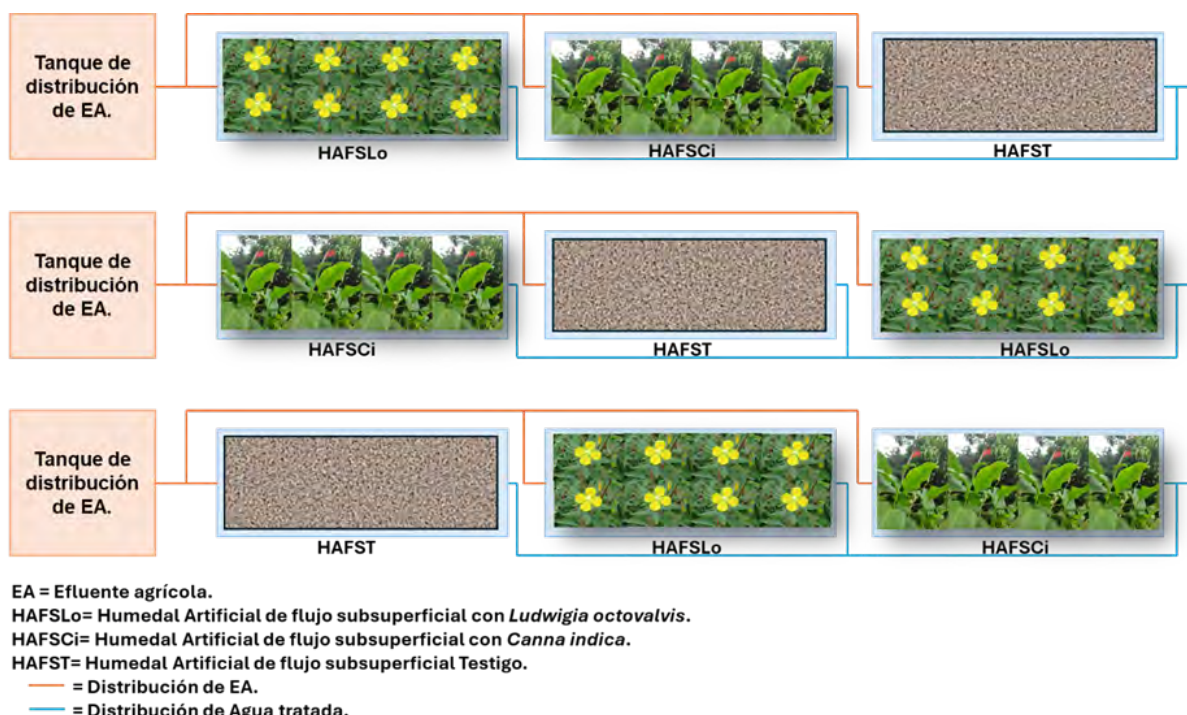


Figura 1 Distribución del Sistema de Tratamiento (Elaboración propia)

Operación y mantenimiento

El efluente se obtiene generando aguas residuales de índole agrícola teniendo en cuenta los componentes de esta, almacenándola en tanques de distribución (200 L) repartiendo el gasto a tres HA, el caudal promedio (Q_{med}) de operación es de $0.23 \text{ m}^3/\text{día}$, los HA presentaron un TRH de 3.6 días, con una altura del medio de soporte de 0.5 m y una porosidad de $n= 49.99\%$, finalmente el efluente es descargado a un humedal natural ubicado en la DACBIOL.

Muestreo siembra y estabilización de las especies

Las especies evaluadas se recolectaron del área natural de la DACBIOL, siendo un área de humedales naturales, la *Ludwigia octovalvis* ($17^{\circ}59.499'N$ y $92^{\circ}58.477'O$) fue extraída específicamente de un arroyo y la *Canna indica* ($17^{\circ}59.479'N$ y $92^{\circ}58.494'O$) de los caminos aledaños a los humedales, se colectaron plantas jóvenes enteras, incluyendo flores y frutos, para su siembra e identificación taxonómica y caracterización según (Castro-Méndez *et al.*, 2022), posterior a la colecta, se realizó la evaluación del crecimiento y comportamiento de la vegetación en los tratamientos según lo planteado por Vásquez *et al.*, (2022) donde establece la determinación de las características: largo máximo de hojas, ancho máximo de hojas, número de hojas por planta, total de plantas por surco, número total de plantas, densidad y productividad (base seca). Estas mediciones se realizaron cada diez días durante la etapa de arranque y cada mes para las etapas de estabilización y evaluación, en la Figura 2 y 3 se visualizan cada una de las especies evaluadas.

Figura 2. Siembra de la especie *Ludwigia octovalvis* (Elaboración propia)Figura 3. Siembra de la especie *Canna indica* (Elaboración propia)

Evaluación del gasto de operación

La medición del gasto de operación se realizó con base al método volumétrico: midiendo el tiempo de llenado (t) de un recipiente de volumen conocido (v), donde se colecta la descarga (Gualpa *et al.*, 2022). La medición del gasto se realizó durante las campañas de monitoreo de la calidad del agua, en las etapas de estabilización y evaluación en horario de 8:00 a 18:00 horas con intervalos de 2 horas.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde: Q= Gasto (L/s); V=Volumen del recipiente (L); y t= tiempo en el que se llena el recipiente (s).

Caracterización de aguas residuales

La caracterización de los parámetros que se establecieron al inicio de la investigación se realizó por los procedimientos analíticos señalados en la Normatividad Oficial Mexicana, Standard Methods y EPA. La temperatura se determinó por el método SM 2550 A, el pH SM 9040 B y la conductividad eléctrica (CE) SM 2510 B, medidos con un multiparamétrico (HI 9828, Hanna Instrument, EUA), además de turbiedad determinada por el método SM 2130 B y el color APHA 2120, ambos medidos por un turbidímetro LaMotteMR (Modelo TC3000we, métodos EPA 180.1y SM 2120B, Rumania). El nitrato se determinó por el método SM 4500-NO₃⁻ B, el fósforo por el método SM 4500-PD y la DQO se determinó mediante el método USEPA 410.4, los 3 parámetros fueron medidos por el equipo Hanna® HI839800-01. Se realizó el monitoreo por 10 días, se tomaron muestras de los tratamientos (Tanque de distribución, HAFST, HAFSL0 y HAFSCi, tiendo un total de 120 muestras simples y 48 muestras compuestas para la determinación de nitrato (NO₃⁻), fósforo (P) y Demanda química de oxígeno (DQO), con base a lo establecido por la NMX-AA-003-1980 que establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear descargas de aguas residuales.

Diseño experimental

Dado que los datos no cumplieron con los postulados de normalidad y homocedasticidad se procedió a emplear una prueba de Kruskal-Wallis como herramienta estadística seguida de la prueba de Bonferroni, las cuales se utilizan para diferencias estadísticas significativas entre puntos de muestreos, las pruebas y los gráficos se realizaron software STATGRAPHICS CENTURION® v19.0, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Eficiencia de remoción

La eficiencia de proceso está dada en función de la concentración promedio de entrada y salida de una sustancia. Para cualquier sustancia dada se puede aplicar el cálculo de eficiencia requerida y eficiencia de proceso de remoción mediante la siguiente ecuación respectivamente (Vallejo *et al.*, 2017).

$$\eta_p = \left(\frac{C1 - C3}{C1} \right) * 100 \quad (2)$$

Donde: η_p = eficiencia de proceso (remoción de una sustancia dada) (%); C1 = Concentración de entrada de la sustancia al sistema (mg/L); y C3 = Concentración de salida de la sustancia del sistema (mg/L).

Resultados y Discusiones

Gasto de operación

En cuanto al gasto en los días de operación (Figura 4), el tratamiento HAFST presenta fluctuaciones máximas de 210 (± 0.38) L/día los días miércoles debido que los alumnos y personas docente y administrativo se encuentran con más frecuencia en la institución y mínimas de 180 (± 1.36) L/día los viernes contemplando que la mayoría de alumnos, decentes y administrativos se no se encuentran presentes en la institución, lo mismo para el tratamiento HAFSL0 con alteraciones máximas de a 212 (± 1.64) L/día y mínimas de 197(± 0.64) L/día en el tratamiento HAFSCi se estimaron

variaciones máximas de 209 (± 1.45) L/día y 195 (± 1.25) L/día, rebasando de manera insignificante el Q de diseño lo cual no genera afectaciones al sistema, a comparación del trabajo de Magaña-Flores y López-Ocaña (2023) donde reportan para humedales artificiales de flujo subsuperficial con 3.6 días de TRH que los días con mayor Q son los viernes con 203.8 L/día, esto debido a que la evaluación fue en tiempo de pandemia teniendo datos homogéneos en los cinco días de la semana.

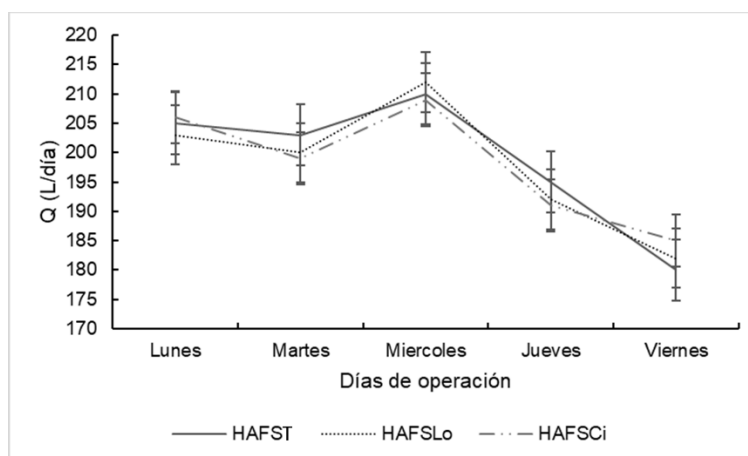


Figura 4. Caudales de operación de los humedales construidos (Elaboración propia)

Calidad del agua

El efluente agrícola que alimenta a los humedales presenta características de un agua residual fuerte al reportarse valores de NO_3^- de 13.4 ± 7.39 mg/L, P con 73 ± 13.02 mg/L y DQO con 4418.8 ± 309.70 mg/L (Hernández - Álvarez *et al.*, 2021). En la Tabla 1, se pueden observar los valores promedio con desviación estándar de cada uno de los tratamientos realizados.

Tabla 1. Valores Promedio ($\pm$ DE) en los Efluentes de las Unidades de Tratamiento ($N=48$) (Elaboración propia)

Parámetros	T. de distribución		HAFST		HAFSL0		HAFSCi	
	x	$\pm$ DE	x	$\pm$ DE	x	$\pm$ DE	x	$\pm$ DE
pH (UpH)	8.4	0.1	8.4	0.1	8.6	0.1	8.7	0.0
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	22	0.4	21.2	0.42	21.1	0.6	20.9	0.7
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$)	1466.4	42.3	646.6	40.1	1202.3	68.1	1196.3	49.0
Color (UC)	2725.3	559.0	169.6	75.0	304.3	88.2	399.7	33.1
Turbiedad (UNT)	34.3	8.7	1.9	0.4	3	0.9	7.5	1.5
P (mg/L)	73	13.0	12.7	1.5	19	4.2	13.2	1.7
NO_3^- (mg/L)	13.3	7.3	6.4	1.4	10.7	8.9	7.6	1.0
DQO (mg/L)	4418.8	309.7	9.3	7.3	84.3	6.1	69	5.0

Nitrato. El NO_3^- fue analizado mediante la prueba de Kruskal-Wallis encontrándose que el valor-P < 0.05 , donde existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presentó en el HAFST con $6 \pm$ ($Q_1 = 4.9$, $Q_3 = 8.6$) mg/L seguido del HAFSCi con $7.8 \pm$ ($Q_1 = 6.1$, $Q_3 = 8.6$) mg/L, para el HAFSL0 se obtuvieron valores de $8.6 \pm$ ($Q_1 = 1.5$, $Q_3 = 24$) mg/L, por último, el valor mediano más alto se reportó en T. de distribución con $12.8 \pm$ ($Q_1 = 4.4$, $Q_3 = 23.6$) mg/L. Los tratamientos de HA cumplen con los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 con 10 mg/L (Figura 4), por otro lado, Gutiérrez *et al.*, (2024) implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial con *Typha domingensis* presento una concentración inicial de 71.0 ± 58.4 mg/L de NO_3^- , obteniendo concentraciones finales de 31.2 ± 28.4 mg/L con una eficiencia de remoción de 43.90%.

Fósforo. El P fue analizado mediante la prueba de Kruskal-Wallis encontrándose que el valor-P <0.05, donde existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presentó en el HAFST con $12.6 \pm (Q_1= 10.9, Q_3= 14.5)$ mg/L seguido del HAFSCi con $13.3 \pm (Q_1=10.6, Q_3= 15.3)$ mg/L, para el HAFSLo se obtuvieron valores de $19.8 \pm (Q_1= 12.9, Q_3= 23.6)$ mg/L, por último, el valor mediano más alto se reportó en T. de distribución con $74.5 \pm (Q_1=56.8, Q_3= 86.2)$ mg/L. incumpliendo con los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 con 10 mg/L (Figura 5), a comparación del trabajo de Muñiz *et al.*, (2024) que implemento un humedal artificial de flujo subsuperficial con *Spathiphyllum blandum* teniendo un agua inicial de 19 ± 17.6 mg/L de P y teniendo en el fuente del tratamiento concentraciones de 16 ± 15.3 mg/L de P con una eficiencia de remoción de 15.7%, mostrando una mejor efectividad en los tratamientos del presente trabajo.

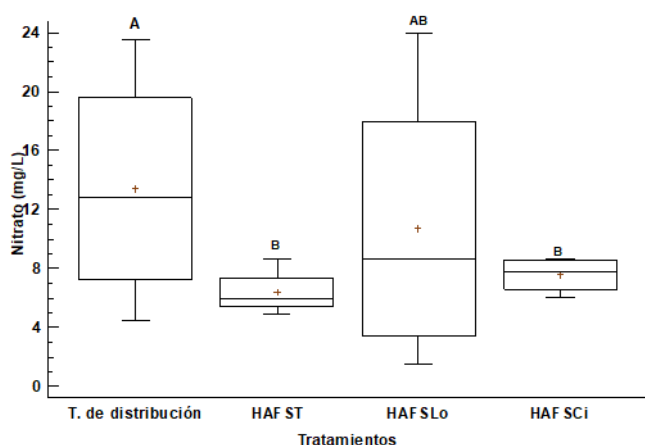


Figura 5. Valores medianos ($\pm Q_1, Q_3$) para la variable NO_3^- (mg/L). Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($N = 48$) (Elaboración propia)

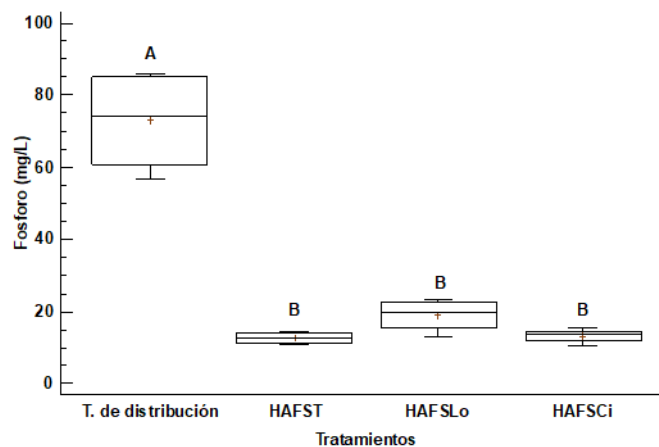


Figura 6. Valores medianos ($\pm Q_1, Q_3$) para la variable P (mg/L). Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($N = 48$) (Elaboración propia)

DQO. La DQO fue analizada mediante la prueba de Kruskal-Wallis encontrándose que el valor-P <0.05, donde existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0% de confianza. El valor mediano más bajo se presentó en el HAFST con $9.3 \pm (Q_1= 2, Q_3= 20)$ mg/L seguido del HAFSCi con $68 \pm (Q_1=64, Q_3= 76)$ mg/L, para el HAFSLo se obtuvieron valores de $82 \pm (Q_1= 79, Q_3= 94)$ mg/L, por último, el valor mediano más alto se reportó en T. de distribución con $4452.5 \pm (Q_1= 3985.0, Q_3= 4785.0)$ mg/L. Los tratamientos de HA cumplen con los límites permisibles establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 con 10 mg/L (Figura 7), en el caso de Castro *et al.*, (2024) propuso un humedal artificial de flujo subsuperficial con *Alpinia purpurata* teniendo concentraciones iniciales de DQO de 2796 ± 2584 mg/L y concentraciones finales de 258.9 ± 236.1 mg/L de DQO con una eficiencia de remoción de 92.6%.

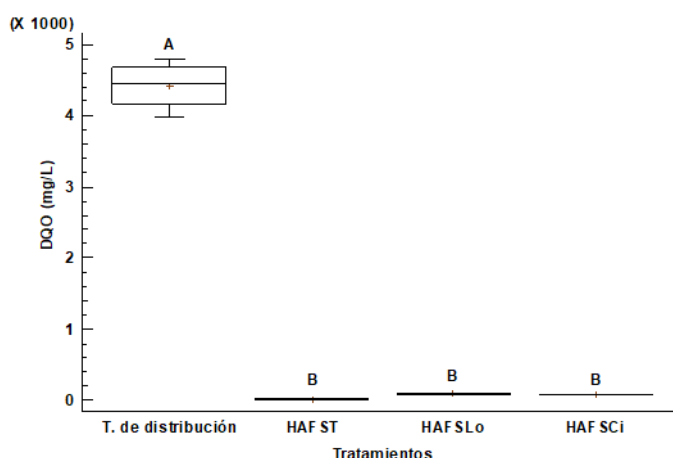


Figura 7. Valores medianos ($\pm Q_1, Q_3$) para la variable DQO (mg/L). Nota: Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($N = 48$) (Elaboración propia)

Eficiencia de remoción

Los parámetros evaluados presentaron eficiencias aceptables, en donde el NO_3^- presenta una eficiencia de remoción del 52.5% para el HAFST, 20.4% para el HAFSLo y un 45.5% para el HAFSCi, el P presentó eficiencias de remoción del 50.5% para el HAFST, 73.9% para el HAFSLo y un 81.9% para el HAFSCi, para la DQO se tuvieron 98.9% para el HAFST, 98.0% para el HAFSLo y un 98.4% para el HAFSCi, la remoción de los demás parámetros se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Eficiencias de remoción de las unidades de tratamiento (N=48). Fuente: Elaboración propia

Parámetros	HAFST (ER%)	HAFSLo (ER%)	HAFSCi (ER%)
CE	23.1	18.0	18.4
Color	89.1	87.5	85.3
Turbiedad	85.3	91.2	78.1
P	50.5	73.9	81.9
NO_3^-	52.5	20.4	43.5
DQO	98.9	98.0	98.4

Características de las especies

En la Tabla 3 se reporta el crecimiento de las especies *Ludwigia octovalvis* y *Canna indica*, en donde la primera tiende tener una proliferación mayor a la segunda a pesar de ser más pequeña físicamente, es un subarbusto semiacuático, así mismo una de sus características iniciales es que pueden acumular glifosato dentro de sus tejidos coadyuvando a los servicios ecosistémicos (López-Chávez *et al.*, 2024) sin embargo, la que presenta mayor porcentaje de humedad es la *Canna indica*, esto se puede explicar debido a que es una planta de rizoma abundante y ramificado lo cual esta labrada por surcos transversales que marcan la base de escamas que la cubren (Viveros *et al.*, 2025).

Tabla 3 Caracterización de las especies. Fuente: Elaboración propia

Parámetro	<i>Ludwigia octovalvis</i>		<i>Canna indica</i>	
	Etapla inicial	Etapla final	Etapla inicial	Etapla final
No. plantas	20	82	15	25
Masa de planta (Kg)	2.0±0.8	2.9±0.0	3.9±0.42	4.9±0.3
Largo de tallo (cm)	59±12.7	119.5±45.9	169.5±27.5	198±4.2
Diámetro de tallo (cm)	8.2±0.3	9.0±3.3	18.5±0.7	19.6±0.2
Largo Raíz (cm)	52±9.8	76.5±25.2	7±1.4	9.5±0.7
No. de hojas	1.8±0.2	2.3±0.7	13±0.7	13.8±0.2
Ancho de la hoja (cm)	2.8±0.2	3.3±1.1	24.1±2.0	28.3±1.0
Largo de Hojas (cm)	19.5±2.1	28.4±9.6	15.4±0.6	16.7±0.2
Biomasa total (kg)	93.4±16.4	165.6±59.7	244.5±32.1	281.4±6.3
Humedad (%)		40±8.6		69±3

Cinética de degradación de contaminantes

El comportamiento cinético para DQO se estimó para un TRH de 3.6 días para los 3 tratamientos, se tomó en cuenta la temperatura promedio de los efluentes, para el HAFST fue 30.02°C, para HAFSLo fue de 30.02 °C y para el HAFSCi fue de 30.05 °C, dándonos como resultados una constante (k) de DQO promedio de 0.44 días⁻¹ para el HAFST, 0.28 días⁻¹ para el HAFSLo y 0.30 días⁻¹ para el HAFSCi como se muestra en la Figura 8, en comparación con el trabajo de Magaña-Flores y López-Ocaña (2023), en donde la cinética de degradación para un humedal artificial de flujo subsuperficial con TRH de 3.5 días, fue de 1.4 días⁻¹ mostrando resultados ligeramente superiores a los de esta investigación.

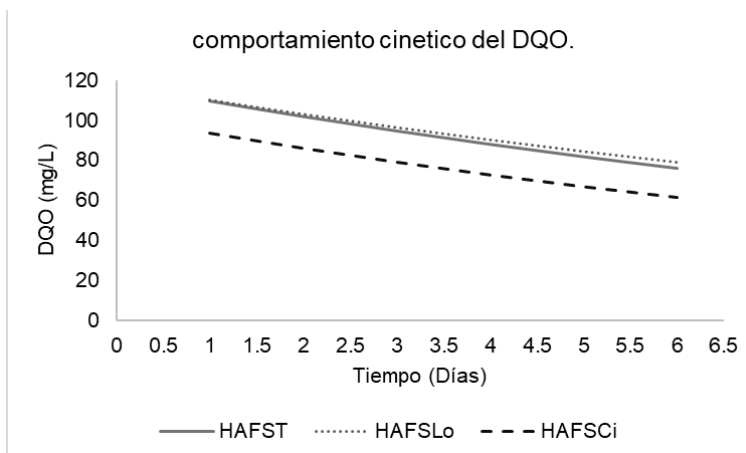


Figura 8. Cinética de degradación para DQO en cada uno de los tratamientos, (días⁻¹) (Elaboración propia)

Para el comportamiento cinético de NO_3^- se estimó para un TRH de 3.6 días para los 3 tratamientos, se tomó en cuenta la temperatura promedio de los efluentes, para el HAFST fue 30.02°C, para HAFSL0 fue de 30.02°C y para el HAFSCi fue de 30.05 °C, dándonos como resultados una constante (k) de Nitrato promedio de 0.05 días⁻¹ para el HAFST, 0.02 días⁻¹ para el HAFSL0 y 0.04 días⁻¹ para el HAFSCi, por otro lado, Gajewska *et al.*, (2020) reportó el comportamiento de nitrato en un humedal artificial de flujo subsuperficial con un TRH de 3.0 días con una k de 2.03 días⁻¹ en comparación con la investigación en donde se obtienen valores muy bajo de k, como se muestra en la Figura 9.

Para el comportamiento cinético de P se estimó para un TRH de 3.6 días para los 3 tratamientos, se tomó en cuenta la temperatura promedio de los efluentes, para el HAFST fue 30.02°C, para HAFSL0 fue de 30.02 °C y para el HAFSCi fue de 30.05 °C, dándonos como resultados una constante (k) de P promedio de 0.12 días⁻¹ para el HAFST, 0.10 días⁻¹ para el HAFSL0 y 0.12 días⁻¹ para el HAFSCi como se muestra en la Figura 10, comparando con Nava-Rojas *et al.*, (2023) que reportó para un humedal artificial de flujo subsuperficial con TRH de 4.02 días, una k promedio de P de 0.15 días⁻¹, siendo ligeramente mayor a los resultados obtenidos en esta investigación.

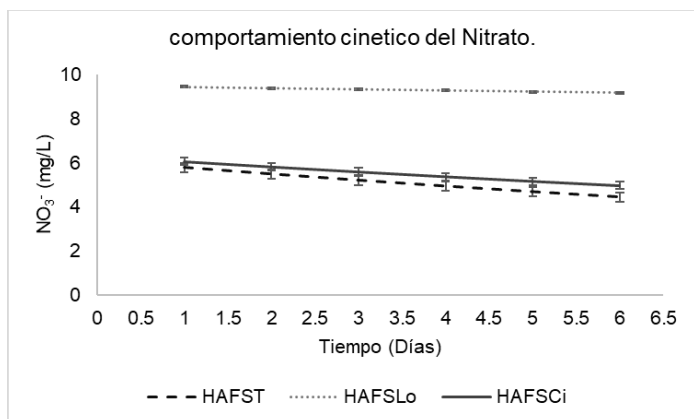


Figura 9. Cinética de degradación para Nitrato en cada uno de los tratamientos, (días⁻¹) (Elaboración propia)

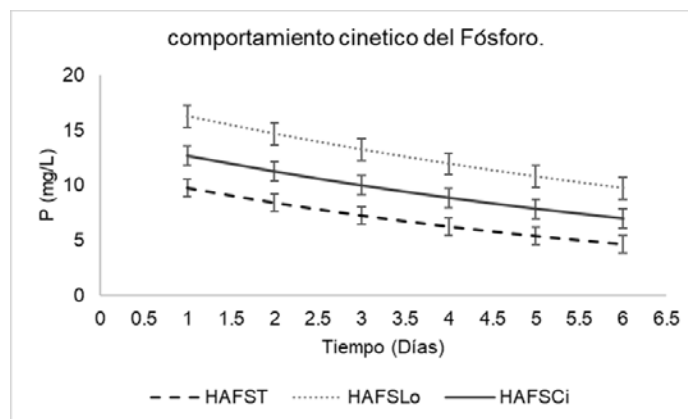


Figura 10. Cinética de degradación para fósforo en cada uno de los tratamientos, (días⁻¹) (Elaboración propia)

Conclusión

Se obtuvieron resultados para el HAFSL0 de 20.4% de remoción de NO_3^- , un 73.9% de fósforo y un 98.0% de DQO, para el HAFSCi se removió un 43.5% de NO_3^- , un 81.9% de fósforo y un 98.4% de DQO y el HAFST presentó un 52.1% de remoción de NO_3^- , un 50.5% de fósforo y 98.9% de DQO. Teniendo en cuenta los presentes resultados las especies no presentan diferencias estadísticamente significativas, el tratamiento HAFSCi muestra un mejor desempeño en la remoción de NO_3^- , P y DQO en comparación con el tratamiento HAFSL0, sin embargo, las especies a pesar de ser de tipo ornamentales cumplen con la función de degradar y asimilar contaminantes siendo una opción viable para el tratamiento de aguas de esta índole.

Bibliografía

- Becerra, A. I. C., Pena, D., & Risso, F. (2024). Plaguicidas y salud socioambiental: las dificultades en el acceso a la información y su impacto socio-político. *revistatekopora.cure.edu.uy*. <https://doi.org/10.36225/tekopora.v5i2.212>
- Beceyro, A. C. (2021). La calidad de las bases de datos para el uso de geotecnologías en salud. *Estrabão*, 2, 105–119. <https://doi.org/10.53455/re.v2i.12>
- Bertullo, V. E. (2020). Venenos, curas y matayuyos: Trabajadores agrícolas y saberes sobre plaguicidas en Uruguay. *Revista de Ciencias Sociales*, 34(48). <https://doi.org/10.26489/rvs.v34i48.3>
- Cáñez-Cota, A. (2021). Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en México: diagnóstico y desafíos de política pública. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(1), 184–245. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-05>
- Castro-Méndez, L., Vallejo-Cantú, N. A., Alvarado-Lassman, A., Orduña-Gaytán, F., & Rosas-Mendoza, E. S. (2022). Evaluación del desempeño de un humedal construido como tratamiento complementario de un efluente azucarero hidrolizado. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 1(1), 414–420. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.237>
- De Jesús Velázquez-Chávez, L., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *Deleted Journal*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>
- Delvalle-Borrero, D. M., Medina, J. R., & Fuentes, K. (2022). Humedales artificiales flotantes y su valor paisajístico en ríos urbanos – Ciudad de Panamá. *Prisma Tecnológico*, 13(1), 3–9. <https://doi.org/10.33412/pri.v13.1.2871>
- Fuerte-Velázquez, Y., De Vivar-Mercadillo, M. R. R., & Fuerte-Velázquez, D. J. (2022). Análisis de riesgo ambiental y de salud por el uso de plaguicidas en la producción de fresa en el municipio de Huiramba, Michoacán. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 1(1), 28–29. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.134>
- Gajewska, M., Skrzypiec, K., Józwiakowski, K., Mucha, Z., Wójcik, W., Karczmarczyk, A., & Bugajski, P. (2020). Kinetics of pollutants removal in vertical and horizontal flow constructed wetlands in temperate climate. *The Science of the Total Environment*, 718, 137371. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137371>
- Gualpa, M., Céleri, R., & Crespo, P. (2022). Effect of weir's theoretical discharge coefficient on discharge measurements in small Andean streams. *La Granja*, 36(2). <https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.06>
- Gutierrez, G., Monay, S., & Farias, M. (2024, 18 octubre). Humedal construido híbrido para la remoción de contaminantes de lixiviado de relleno sanitario de Rafaela. <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/ajea/article/view/1617>
- Hernandez-Alvarez, U., Pinedo-Hernandez, J., Paternina-Urbe, R., & Marrugo-Negrete, J. L. (2021). Evaluación de calidad del agua en la Quebrada Jui, afluente del río Sinú, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1678>
- Jáquez-Matas, S. V., Pérez-Santiago, G., Márquez-Linares, M. A., & Pérez-Verdín, G. (2022). Impactos económicos y ambientales de los plaguicidas en cultivos de maíz, alfalfa y nogal en Durango, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. <https://doi.org/10.20937/rica.54169>
- Magaña-Flores, A., López-Ocaña, G., & Romellón-Cerino, M. J. (2022). Kinetic behavior and modeling the space distribution of basic pollutants in a subsurface flow constructed wetlands with *Pontederia cordata*. *Renewable Energy, Biomass & Sustainability (REB&S)*, 4(1), 1–13. <https://doi.org/10.56845/rebs.v4i1.64>
- Magaña-Flores, A., & López-Ocaña, G. (2023). Domestic wastewater treated with *Sagittaria latifolia* in constructed wetlands. *DYNA*, 90(226), 27–35. <https://doi.org/10.15446/dyna.v90n226.105263>
- Muñiz, J. L. M., Alba, E. L., Herazo, L. S., & Zamora, S. (2024). Remoción de contaminantes de aguas residuales comunitarias mediante humedales de tratamiento: efecto de la vegetación y posicionamiento de sembrado para condiciones de diseño. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9589964>
- Muñiz, J. L. M., Castro, S. A. Z., & Rivadeneira, D. G. (2024). Depuración de aguas residuales de la industria láctea con humedales construidos sembrados con policultivos de diferentes densidades de plantas ornamentales. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10074998>
- Nava-Rojas, J., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. del R., & Reyes-Velázquez, C. (2023). Remoción de contaminantes en los humedales artificiales de flujo subsuperficial: Una revisión. *Terra Latinoamericana*, 41, e1715. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1715>
- NMX-AA-003-1980. (2023, 15 de diciembre). *Normalización*. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-aa-003-1980/>
- NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece límites de contaminantes en descargas de aguas residuales. (2025, 6 de junio). *gob.mx*. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/se-publica-nom-001-semarnat-2021-que-establece-limites-de-contaminantes-en-descargas-de-aguas-residuales>
- Romellón-Cerino, M. J., Estrada-Pérez, N., & López-Ocaña, G. (2022). Remoción y cinética de contaminantes básicos en humedales artificiales en serie. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 1(1), 108–118. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.123>
- Vallejo, M. V. C., Mejía-Lopez, A., & Carillo, Y. (2017). Remoción de contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala de laboratorio. *La Granja*, 26(2), 72. <https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.07>
- Vásquez, L. A. H., García, F. P., Méndez, J. P., Sánchez, E. M. O., & Lassman, A. A. (2022). Evaluación de macrófitas flotantes para el tratamiento de un agua residual sintética en humedales artificiales. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 1(1), 125–129. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.131>

Desarrollo y evaluación de un protocolo adaptado para la extracción de microplásticos en suelos urbanos

Andrea Zambrano-Arizpe ¹, Teresa de Jesús Montalvo-Herrera ¹, Mario Jesús Muñoz-Batista ², Mónica Calero-de Hoces ², David Clemente López-Pérez ³, Astrid Iriana Sánchez-Vázquez ^{1*}

¹ Laboratorio de Materiales III, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México

² Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Granada, Granada, Andalucía, España

³ Departamento de Hidráulica, Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, Nuevo León, México

* Autor de correspondencia: astrid.sanchezvz@uanl.edu.mx

Contaminación del agua, suelo y aire (Monitorio de contaminantes)

Recibido: 11 de junio de 2025

Aceptado: 13 de julio de 2025

Publicado: 30 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.495>

Resumen: La contaminación por microplásticos en suelos urbanos es un problema ambiental emergente que amenaza tanto la salud de los ecosistemas urbanos como la salud humana. Este estudio se enfoca en analizar los desafíos asociados al muestreo y extracción de microplásticos en suelos urbanos del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), así como en proponer estrategias que optimicen tanto la recuperación de los microplásticos, como su posterior análisis en laboratorio. Se realizaron muestreos de suelo superficial en cuatro campus universitarios del AMM, seleccionados por su alta densidad poblacional y variedad de actividades humanas. Para el muestreo de los sitios se siguieron normativas mexicanas y se empleó un diseño de muestreo combinado (por juicio y aleatorio). Los microplásticos fueron extraídos a través de digestión orgánica con H₂O₂ y separación por densidad utilizando ZnCl₂, y su posterior identificación se realizó por microscopía óptica. Los resultados revelaron la presencia de diversos morfotipos de microplásticos, como fragmentos, fibras, films y pellets. Sin embargo, la extracción no resultó completamente eficiente debido a la presencia de materia orgánica y a la recuperación ineficaz de los microplásticos más pequeños en el filtro, lo que dificultó su posterior caracterización química. Además, la toxicidad y el alto costo de los reactivos utilizados, como el ZnCl₂, representaron limitaciones en la metodología. En consecuencia, este estudio subraya la necesidad de investigar alternativas más sostenibles y eficientes para optimizar el proceso de análisis en el laboratorio.

Palabras clave: microplásticos, muestreo de suelo, extracción de microplásticos, suelo urbano

Development and assessment of an adapted protocol for the extraction of microplastics in urban soils

Abstract: Microplastic pollution in urban soils is an emerging environmental issue that threatens both urban ecosystem health and human well-being. This study focuses on analyzing the challenges associated with sampling and extracting microplastics from urban soils in the Monterrey Metropolitan Area (MMA), and on proposing strategies to optimize both collection and laboratory analysis. Surface soil samples were collected from four university campuses within the MMA, selected due to their high population density and variety of human activities. Site sampling followed Mexican regulations and employed a combined design (judgmental and random sampling). Microplastics were extracted through organic matter digestion with H₂O₂ and density separation using ZnCl₂, followed by identification through optical microscopy. The results revealed the presence of various microplastic morphotypes, such as fragments, fibers, films, and pellets. However, the extraction process was not fully efficient due to the presence of organic matter and the poor recovery of smaller microplastics on the filter, which hindered their subsequent chemical characterization. Moreover, the toxicity and high cost of reagents such as ZnCl₂ posed limitations to the methodology. Consequently, this study highlights the need to explore more sustainable and efficient alternatives to optimize the laboratory analysis process.

Keywords: microplastics, soil sampling, microplastic extraction, urban soil

Introducción

La contaminación ambiental por microplásticos representa una seria amenaza a la preservación y al aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. Estos polímeros pueden ingresar a los ecosistemas a través de diversas actividades antropogénicas como el vertido ilegal de desechos plásticos, la liberación accidental durante su manufactura y traslado, o el inadecuado manejo de los residuos sólidos urbanos (Lamichhane *et al.*, 2023). Desafortunadamente, estos plásticos no desaparecen en el ambiente, sino que se fragmentan en pedazos cada vez más pequeños, hasta llegar a ser partículas microscópicas, conocidas como microplásticos (< 5 mm).

Actualmente, gran parte de los estudios sobre los efectos nocivos, la abundancia y la distribución de los microplásticos se han enfocado principalmente en los ecosistemas acuáticos y marinos, donde se estima que cada año ingresan aproximadamente 10 millones de toneladas de (micro)plásticos a los océanos (Alvarado-Zambrano *et al.*, 2023; Borges Ramírez *et al.*, 2019; Cruz-Salas *et al.*, 2023; Flores-Ocampo & Armstrong-Altrin, 2023; Mejía-Estrella *et al.*, 2023; Ramírez-Álvarez *et al.*, 2020). No obstante, cerca del 80 % de estos residuos plásticos se generan y liberan desde fuentes terrestres, lo que convierte al suelo en un posible reservorio a largo plazo de microplásticos (Möller *et al.*, 2020).

El suelo es una mezcla de diversos tipos de gases, líquidos, materia orgánica y minerales que pueden sustentar la vida del planeta. Este actúa como medio para múltiples servicios ecosistémicos, como los ciclos biogeoquímicos, la captura de carbono y promoción de la biodiversidad (Afrin *et al.*, 2020). Dentro de la clasificación de los suelos, el suelo urbano se distingue como una categoría particular debido a las profundas modificaciones que sufre por efecto de las actividades antropogénicas. En las zonas urbanas, la construcción de edificaciones, el desarrollo de infraestructuras, la compactación y el crecimiento poblacional alteran drásticamente las propiedades naturales del suelo (Ihenetu *et al.*, 2024; Prokof'Eva *et al.*, 2020).

Debido a su alta exposición a las actividades humanas, los suelos urbanos de las áreas metropolitanas se consideran especialmente vulnerables a la contaminación por microplásticos (Afrin *et al.*, 2020). Aunque los mecanismos aún no se comprenden completamente, diversos estudios indican que los microplásticos pueden modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo, como la capacidad de retención de agua, la densidad aparente y la tasa de evaporación. Debido a su alta área superficial e hidrofobicidad, también pueden adsorber contaminantes tóxicos como pesticidas y metales pesados. Una vez en el ambiente, estas partículas pueden ingresar al organismo por vías dérmica, pulmonar o digestiva, provocando posibles efectos adversos como inflamación intestinal, alteraciones en la microbiota, constricción bronquial y síntomas similares al asma (Lamichhane *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2020).

Sin embargo, el verdadero alcance de esta contaminación aún es desconocido, principalmente por la ausencia de una metodología estandarizada para el muestreo y caracterización de suelos urbanos contaminados. Además, la falta de herramientas analíticas específicas dificulta la detección y correcta identificación de los microplásticos en el suelo urbano. Esta situación se ve agravada por la complejidad inherente a la matriz del suelo, así como por los retos asociados con el rastreo y análisis de un analito sólido dentro de una muestra compuesta mayoritariamente por sólidos (Möller *et al.*, 2020).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar los desafíos asociados al muestreo y la extracción de microplásticos en suelos urbanos del Área Metropolitana de Monterrey, así como proponer estrategias que optimicen tanto la recolección como el análisis en laboratorio. De esta manera, se busca no solo mejorar la precisión y comparabilidad de los datos obtenidos, sino también contribuir a una comprensión más integral y responsable del impacto de los microplásticos en los entornos urbanos.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) se ubica como la tercera región más poblada de México, con una población de 5,341,171 habitantes, y representa la segunda zona económica e industrial más grande del país. Este conglomerado urbano abarca una superficie de 5,346.80 km² e incluye los municipios de Apodaca, Cadereyta Jiménez, El Carmen, García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y Santiago (Breton *et al.*, 2021; Castillo-Nava, 2024) (Figura 1).

Las condiciones climáticas y geográficas de la región hacen de la AMM un sitio estratégico para el estudio del transporte y dispersión de contaminantes, en particular microplásticos. Durante los meses de verano, el clima se caracteriza por una marcada aridez, mientras que en primavera y otoño predominan las lluvias estacionales. Esta estacionalidad, sumada a una orografía facilita la circulación de partículas y favorece el transporte de contaminantes con trayectorias y destinos difíciles de predecir (Castillo-Nava, 2024; Orta-García *et al.*, 2016).

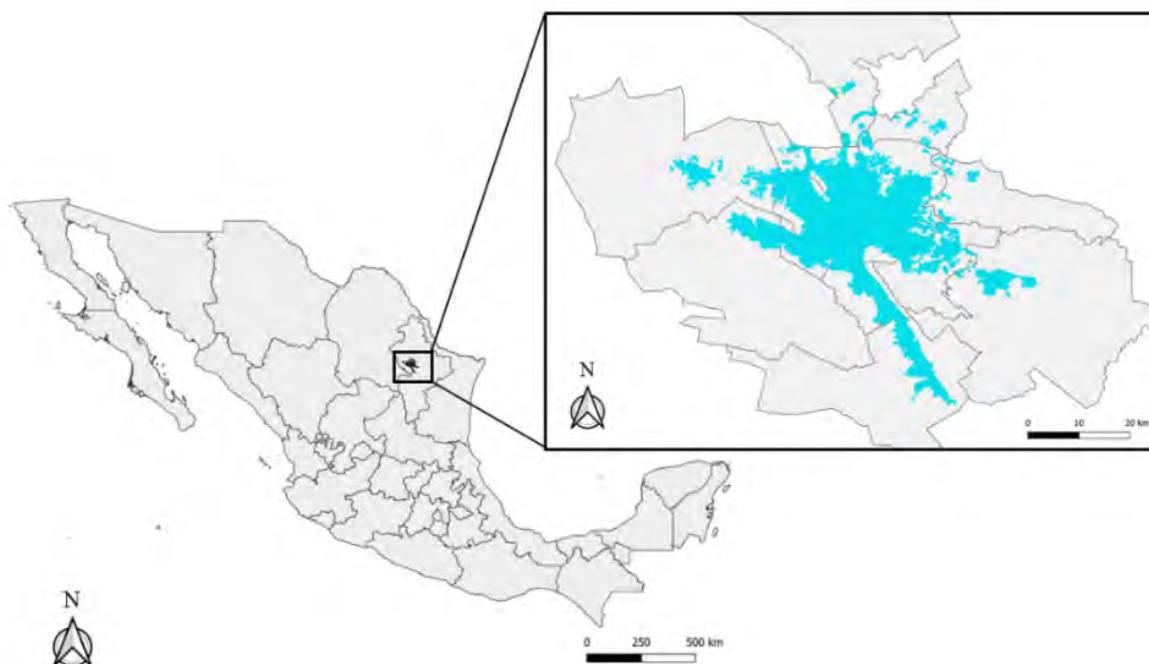


Figura 1. Mapa del Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México

En este estudio, se llevó a cabo un muestreo del suelo urbano en cuatro campus universitarios ubicados en el AMM (Monterrey Sur, Monterrey Centro, Escobedo y San Nicolás de los Garza). Estos sitios fueron seleccionados debido a su alta densidad poblacional, el intenso flujo vehicular y la diversidad de actividades que albergan, tales como las educativas, administrativas, comerciales, deportivas, entre otras.

Muestreo del suelo urbano

La toma de muestras del suelo urbano del AMM se realizó de acuerdo con la NMX-AA-132-SCFI-2016 y NOM-021-RECNAT-2000; considerando las siguientes modificaciones. Previamente, todo material utilizado para el muestreo fue lavado con agua destilada (filtrada utilizando fibra de vidrio grado GF/A) y acetona tres veces a fin de descartar cualquier presencia de contaminación por partículas plásticas que no correspondieran a los de los sitios de muestreo; por ejemplo, traslado, manipulación y contaminación ambiental del laboratorio. Así mismo, durante la preparación del material y muestreo, la vestimenta del personal del laboratorio consistió en prendas de algodón, libres de polímeros sintéticos.

Una vez delimitada el área de estudio, se tomaron muestras superficiales aleatorias (1 – 10 cm) del suelo urbano a fin de formar muestras complejas que consistieron entre cinco y ocho puntos de muestreo. Estas fueron tomadas con herramientas libres de plástico (utensilios de madera, material de aluminio o vidrio con tapa de acero inoxidable) y en sentido contrario a la dirección del viento. Además, se distribuyeron cajas Petri de vidrio con un filtro de fibra de vidrio grado GF/A, que fueron utilizados como controles atmosféricos por cada campus universitario. Finalmente, cada muestra estaba compuesta de suelo urbano de parques, pasillos, jardinerías, banquetas y calles. Los muestreos fueron realizados dos semanas después de un periodo de lluvias con el fin de evitar una estimación incorrecta de la abundancia de los microplásticos presentes en el suelo urbano. Esto debido a que la presencia de agua en el suelo influye en el movimiento de las partículas, donde microplásticos con mayor densidad pueden transportarse entre las partículas del suelo, mientras que plásticos menos densos pueden flotar hacia la superficie.

Extracción de microplásticos

Las muestras del suelo urbano fueron esparcidas en recipientes de aluminio y tapadas para ser secadas en horno a 60 °C durante un periodo de tiempo de 24 a 48 h (considerando el porcentaje de humedad del día del muestreo).

Posteriormente, se cribaron las muestras secas utilizando un tamiz malla 5, para descartar todo aquello mayor a 4 mm. Nuevamente, el suelo se cribó con una malla 200 (>0.074 mm) donde la fracción retenida fue almacenada en recipientes de vidrio con tapa de acero inoxidable para su posterior análisis.

A continuación, se tomaron submuestras de 2 gramos (por triplicado) para realizar la extracción de microplásticos. Para comenzar, se realizó la digestión orgánica con H_2O_2 al 30% en una relación sedimento-solución de 1:3 y se dejó reposar por 72 h. En el mismo tubo de ensayo, se realizó la extracción de los microplásticos por el método de separación por densidad con una solución saturada de $ZnCl_2$ ($\rho = 1.5$ g/cm³), manteniendo la relación anterior. Cada tubo de ensayo se agitó durante 2 minutos y se dejó reposar durante 24 h. El sobrenadante se filtró utilizando fibra de vidrio grado GF/A. Este paso se repitió tres veces.

Finalmente, el filtro fue colocado en cajas Petri de vidrio para ser secados en el horno a 60 °C por 24 h. Los microplásticos extraídos fueron observados por microscopía óptica utilizando una cámara Leica ICC50 W incorporada en un microscopio Leica DME.

Resultados y Discusión

En los estudios de monitoreo ambiental de contaminantes, uno de los aspectos clave es la toma de muestras en las áreas de estudio. No obstante, este paso es a menudo subestimado, lo que conduce a la recolección de muestras no representativas y, por ende, a datos poco fiables, independientemente de la precisión del procesamiento posterior (Möller *et al.*, 2020). En el caso específico de los microplásticos, aún no existe una normativa oficial ni una metodología estandarizada que proporcione directrices consistentes para el muestreo y la extracción en las distintas matrices ambientales (agua, suelo, aire y organismos). Esta ausencia de estandarización dificulta la interpretación precisa del estado actual de la contaminación por estos polímeros y limita la posibilidad de realizar comparaciones válidas entre los estudios existentes.

Por lo tanto, el presente estudio propone realizar un diseño de muestreo que consista en dos partes, dado que los microplásticos no suelen distribuirse homogéneamente, si no que suelen acumularse en zonas específicas (Möller *et al.*, 2020). En primer lugar, realizar un muestreo por juicio para identificar las zonas dentro de las áreas de muestreo (campus universitarios) con mayor actividad humana. Posteriormente, dentro de cada una de estas zonas, llevar a cabo un muestreo aleatorio simple, en el que los puntos de muestreo son seleccionados bajo el principio de que todos tendrán la misma probabilidad de ser elegidos, lo que permite garantizar una mayor fiabilidad de los datos (Möller *et al.*, 2020).

La elección de una muestra compleja se plantea principalmente por la considerable variabilidad en el tamaño de los microplásticos, lo que sugiere que su distribución en el suelo también podría variar significativamente. Para contrarrestar esta heterogeneidad, el uso de muestras complejas resulta beneficioso, ya que permite obtener una representación más precisa del alcance de la contaminación por microplásticos, sin necesidad de manipular un número elevado de muestras. Además, se ha analizado la superficie del suelo dentro de los 10 cm superficiales, ya que este es el rango donde más probablemente se encuentren la mayor parte de los microplásticos (Möller *et al.*, 2020).

Por otro lado, aún no existe un consenso claro respecto a la cantidad de muestra que debe ser recolectada por cada zona de muestreo. De hecho, la mayoría de los estudios publicados hasta la fecha omiten esta información, y en algunos casos se han reportado volúmenes de hasta 4 kg (Flores-Ocampo & Armstrong-Altrin, 2023). No obstante, en el desarrollo efectuado se sugiere que las muestras recolectadas en campo deberían ser de entre 1 - 2 kg. Esta cantidad es necesaria no solo para la cuantificación de microplásticos, sino también para la realización de análisis fisicoquímicos, tales como contenido de agua, porosidad, textura, consistencia del suelo y porcentaje de arcilla, además de permitir la conservación de una muestra de respaldo. Asimismo, debido a la naturaleza heterogénea en la distribución de microplásticos en el suelo, se considera que muestras de mayor volumen recolectadas en campo son más representativas que aquellas de menor tamaño. Estas pueden luego ser reducidas a una muestra de laboratorio más manejable mediante procesos de homogeneización.

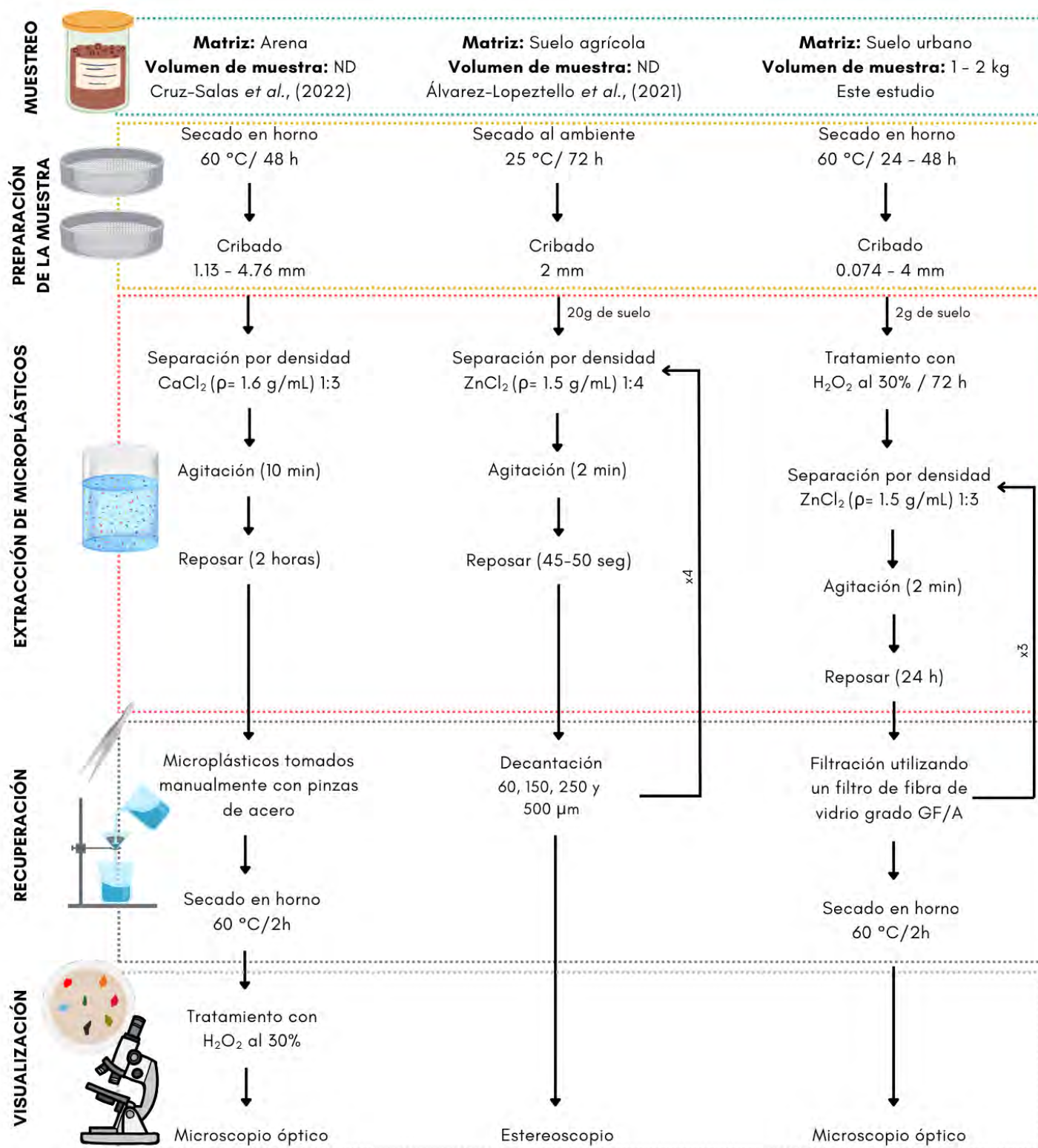


Figura 2. Representación esquematizada de las metodologías empleadas para la extracción de microplásticos en matrices como arena, suelo agrícola y suelo urbano. ND: No determinado.

Originalmente, la investigación sobre microplásticos se enfocó en ambientes acuáticos y marinos, donde su extracción se realizaba a partir de la columna de agua o de sedimentos, especialmente de la arena en las zonas costeras. Con el tiempo, surgió la necesidad de expandir estos estudios hacia los suelos, tanto agrícolas como urbanos, adaptándose las metodologías inicialmente desarrolladas para matrices acuáticas a estos nuevos entornos terrestres. Sin embargo,

trabajar con una matriz tan compleja y heterogénea como el suelo urbano y con analitos sólidos como los microplásticos, requiere ajustar tanto el diseño del muestreo como los procedimientos de extracción, de acuerdo con las particularidades de estas superficies y los objetivos específicos de cada investigación.

Para superar estas limitaciones, en la presente investigación se implementaron técnicas de extracción previamente empleadas en otras matrices, introduciendo modificaciones específicas para adecuarlas al suelo urbano. Como se observa en la Figura 2, los protocolos de separación por densidad son los más comúnmente utilizados en este tipo de estudios. Esta metodología ha demostrado ser eficaz en zonas costeras, donde los microplásticos presentan una densidad menor que las partículas de arena (1.65 g cm^{-3}), permitiendo su separación eficiente mediante flotación. No obstante, al aplicar esta técnica a suelos urbanos, surgen dificultades adicionales. En particular, el incremento del contenido de arcilla representa un obstáculo, ya que las partículas arcillosas tienen densidades similares ($1.0 - 1.4 \text{ g cm}^{-3}$) a las de muchos plásticos ($0.9 - 1.3 \text{ g cm}^{-3}$), reduciendo así la eficacia del proceso de separación. Además, el tamaño fino de estas partículas favorece la formación de agregados que pueden encapsular a los microplásticos, dificultando su aislamiento e identificación.

Frente a esta problemática, la propuesta presentada plantea un tratamiento previo con H_2O_2 al 30%, aplicado durante un período de 72 h. Esta oxidación química ayuda a descomponer la materia orgánica y a liberar microplásticos atrapados en agregados arcillosos, permitiendo así una estimación más precisa de su abundancia. La utilidad de este tratamiento se refleja en los resultados obtenidos en el presente estudio, donde se identificaron morfotipos como films (Figura 3, b) y pellets (Figura 3, c), que no fueron detectados por Álvarez-Lopezello *et al.*, (2021) quienes sólo lograron aislar fragmentos y fibras empleando una metodología sin tratamiento previo.

Además, se propone extender el tiempo de reposo de las muestras a 24 h para favorecer la decantación del material arcilloso y facilitar la separación. Sin embargo, esta estrategia no siempre es suficiente. Como se muestra en la Figura 3, incluso tras este tiempo persiste la presencia de materia orgánica y partículas de suelo, lo que complica el conteo de microplásticos al microscopio y dificulta su recuperación para su caracterización química.

De forma complementaria, Cruz-Salas *et al.*, (2022) reportaron la presencia de fibras, fragmentos, films y partículas de espuma en arena. No obstante, es importante subrayar que el análisis manual mediante pinzas introduce un sesgo considerable, ya que depende exclusivamente de la observación visual, limitando así la cantidad y variedad de partículas detectadas. Por tanto, esta técnica no se considera adecuada para el análisis exhaustivo de suelos urbanos.

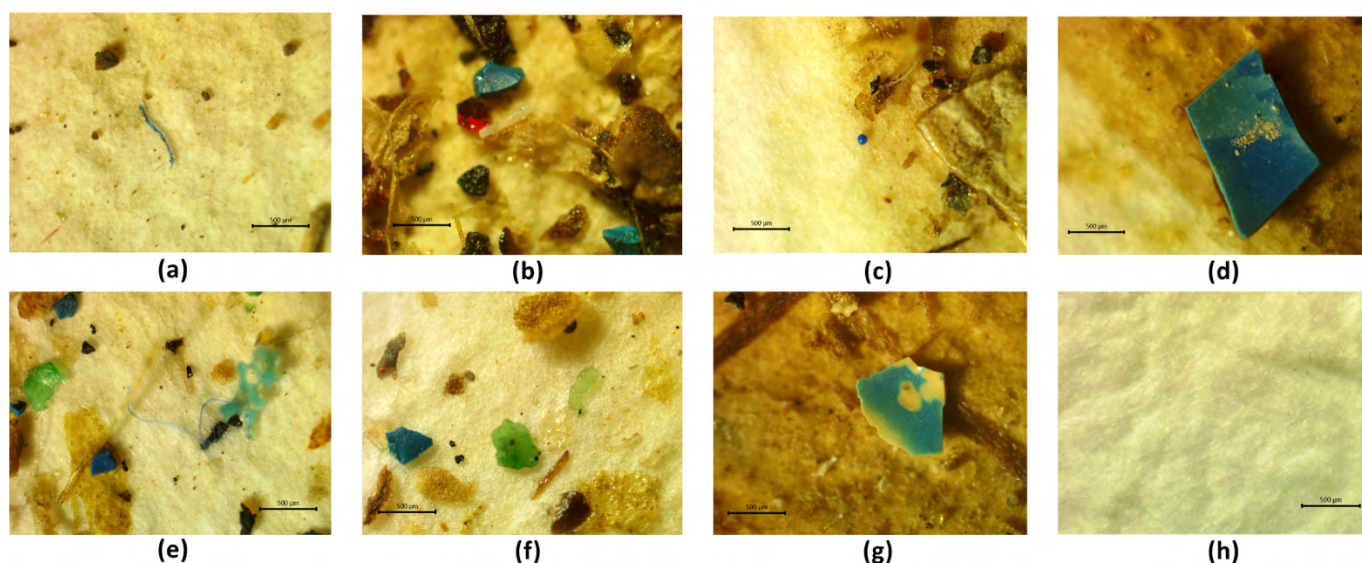


Figura 3. Microplásticos localizados en las muestras de suelo del AMM observados a 10X por microscopía óptica. La escala seleccionada fue de $500 \mu\text{m}$. Los morfotipos identificados fueron (a) fibras, (b, d - g) fragmentos, films y (c) pellets; (h) es el control utilizado durante el proceso de extracción.

A pesar de que las modificaciones realizadas durante el muestreo y la extracción de microplásticos facilitan la recuperación de morfotipos como fragmentos, fibras, films y pellets, es fundamental considerar algunas limitaciones de esta propuesta cuando se aplica a suelos urbanos. Durante el proceso de agitación y sedimentación, el sobrenadante que contiene los microplásticos se transfiere a un sistema de filtración, lo que puede generar pérdidas durante la decantación. Además, el uso de una solución de ZnCl_2 aumenta tanto el costo de la técnica como los riesgos asociados, ya que este reactivo es corrosivo y tóxico (Möller *et al.*, 2020). Otro inconveniente es la dificultad para recuperar los microplásticos, los cuales a menudo se quedan atrapados en el filtro o se mezclan con la materia orgánica que se sedimenta durante la decantación, por lo que su verificación mediante técnicas como FTIR y Raman sigue siendo un desafío.

El uso combinado de H_2O_2 y ZnCl_2 en el proceso de extracción de microplásticos ha demostrado ser eficaz, pero plantea varios desafíos relacionados con la sostenibilidad, la seguridad y la eficiencia general del proceso. En este sentido, se sugiere la implementación de sistemas que optimicen la recuperación y reutilización de reactivos, lo que podría reducir significativamente los residuos generados (Rodrigues *et al.*, 2020). Además, se recomienda explorar la sustitución de estos reactivos por alternativas más sostenibles, como compuestos menos tóxicos o derivados de residuos industriales. Por ejemplo, se ha evaluado el uso de aceites residuales provenientes del sector alimentario como posible sustituto del ZnCl_2 debido a su capacidad potencial de facilitar la separación de los microplásticos. Sin embargo, hasta ahora se ha observado que estos aceites no alcanzan la densidad requerida para lograr una separación efectiva de la mayoría de los microplásticos. Esta alternativa, aunque prometedora, requiere de más investigación y optimización antes de poder implementarse de manera viable.

Conclusiones

La presente investigación aporta un avance metodológico relevante para el monitoreo de microplásticos en suelos urbanos de áreas metropolitanas, al proponer por primera vez un protocolo integral adaptado a las condiciones heterogéneas de esta matriz ambiental. La implementación de un diseño de muestreo combinado y el manejo adecuado de muestras complejas permitió obtener datos más representativos sobre la distribución y el nivel de contaminación de los microplásticos en zonas urbanas. Además, la incorporación de una etapa de digestión orgánica previa a la separación por densidad facilita la remoción de partículas arcillosas, mejorando la recuperación y estimación de la abundancia de microplásticos. Si bien la metodología propuesta presenta mayores ventajas que otros métodos reportados, aún persisten limitaciones importantes, como la interferencia de materia orgánica residual en los procesos de identificación visual y caracterización química. No obstante, este trabajo sienta las bases para el desarrollo de métodos estandarizados aplicables en contextos urbanos de alta complejidad ambiental.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores de este trabajo agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, así como al proyecto PROACTI-115-BYQ por los recursos económicos para la gestión del proyecto.

Bibliografía

- Afrin, S., Uddin, M. K., & Rahman, M. M. (2020). Microplastics contamination in the soil from urban landfill site, Dhaka, Bangladesh. *Heliyon*, 6(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05572>
- Alvarado-Zambrano, D., Rivera-Hernández, J. R., & Green-Ruiz, C. (2023). First insight into microplastic groundwater pollution in Latin America: The case of a coastal aquifer in Northwest Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(29), 73600–73611. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27461-9>
- Álvarez-Lopezello, J., Robles, C., & del Castillo, R. F. (2021). Microplastic pollution in neotropical rainforest, savanna, pine plantations, and pasture soils in lowland areas of Oaxaca, Mexico: Preliminary results. *Ecological Indicators*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107084>
- Borges Ramírez, M. M., Dzul Caamal, R., & Rendón von Osten, J. (2019). Occurrence and seasonal distribution of microplastics and phthalates in sediments from the urban channel of the Ria and coast of Campeche, Mexico. *Science of the Total Environment*, 672, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.472>
- Breton, R. M. C., Breton, J. C., Fuentes, M. de la L. E., Kahl, J., Guzman, A. A. E., Martínez, R. G., Guarnaccia, C., Severino, R. D. C. L., Lara, E. R., & Francavilla, A. B. (2021). Short-term associations between morbidity and air pollution in metropolitan area of Monterrey, Mexico. *Atmosphere*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/atmos12101352>
- Castillo-Nava, D. (2024). *Determinación del índice de riesgo ecológico en la zona metropolitana de Monterrey debido a metales pesados (Pb y Cd) y empleo de estrategias de biorremediación para su mitigación a través de un humedal artificial*. UANL.
- Cruz-Salas, A. A., Alvarez-Zeferino, J. C., Ojeda-Benitez, S., Cruz-Sotelo, S. E., & Vázquez-Morillas, A. (2022). Solid waste and microplastics on the beaches of Holbox Island, Mexico. *Regional Studies in Marine Science*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102423>

- Cruz-Salas, A. A., Alvarez-Zeferino, J. C., Tapia-Fuentes, J., Lobato-Rocha, S. L. D., Vázquez-Morillas, A., Ojeda-Benítez, S., & Cruz-Sotelo, S. E. (2023). Presence of microplastics in the vaquita marina protection zone in Baja California, Mexico. *Microplastics*, 2(4), 422–436. <https://doi.org/10.3390/microplastics2040031>
- Flores-Ocampo, I. Z., & Armstrong-Altrin, J. S. (2023). Abundance and composition of microplastics in Tampico beach sediments, Tamaulipas State, southern Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114891>
- Ihenetu, S. C., Li, G., Mo, Y., & Jacques, K. J. (2024). Impacts of microplastics and urbanization on soil health: An urgent concern for sustainable development. In *Green Analytical Chemistry* (Vol. 8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2024.100095>
- Lamichhane, G., Acharya, A., Marahatha, R., Modi, B., Paudel, R., Adhikari, A., Raut, B. K., Aryal, S., & Parajuli, N. (2023). Microplastics in environment: Global concern, challenges and controlling measures. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), 4673–4694. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04261-1>
- Mejía-Estrella, I. A., Peña-Montes, C., Peralta-Peláez, L. A., Del Real Olvera, J., & Sulbarán-Rangel, B. (2023). Microplastics in sandy beaches of Puerto Vallarta in the pacific coast of Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/su152115259>
- Möller, J. N., Löder, M. G. J., & Laforsch, C. (2020). Finding microplastics in soils: A review of analytical methods. *Environmental Science and Technology*, 54(4), 2078–2090. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04618>
- Orta-García, S. T., Ochoa-Martínez, A. C., Carrizalez-Yáñez, L., Varela-Silva, J. A., Pérez-Vázquez, F. J., Pruneda-Álvarez, L. G., Torres-Dosal, A., Guzmán-Mar, J. L., & Pérez-Maldonado, I. N. (2016). Persistent organic pollutants and heavy metal concentrations in soil from the Metropolitan Area of Monterrey, Nuevo León, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 70(3), 452–463. <https://doi.org/10.1007/s00244-015-0239-3>
- Prokof'eva, T., Umarova, A., Bykova, G., Suslenkova, M., Ezhelev, Z., Kokoreva, A., Gasina, A., & Martynenko, I. (2020). Morphological and physical properties in diagnostics of urban soils: Case study from Moscow, Russia. *Soil Science Annual*, 71(4), 309–320. <https://doi.org/10.37501/soilsa/131598>
- Ramírez-Álvarez, N., Ríos Mendoza, L. M., Macías-Zamora, J. V., Oregel-Vázquez, L., Alvarez-Aguilar, A., Hernández-Guzmán, F. A., Sánchez-Osorio, J. L., Moore, C. J., Silva-Jiménez, H., & Navarro-Olache, L. F. (2020). Microplastics: Sources and distribution in surface waters and sediments of Todos Santos Bay, Mexico. *Science of the Total Environment*, 703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134838>
- Rodrigues, M. O., Gonçalves, A. M. M., Gonçalves, F. J. M., & Abrantes, N. (2020). Improving cost-efficiency for MPs density separation by zinc chloride reuse. *MethodsX*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100785>
- Wang, W., Ge, J., Yu, X., & Li, H. (2020). Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective. *Science of the Total Environment*, 708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134841>

Los humedales construidos como estrategia de reúso de aguas residuales de cooperativas escolares rurales en agricultura

José Antonio Fernández-Viveros ¹, Jacel Adame-García ¹, Saúl Rivera ², Félix David Murillo-Cuevas ¹ y Mayerlin Sandoval-Herazo ^{1,3,*}

¹ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, Carretera Cd Cardel-Chachalacas km 4.5, Úrsulo Galván 91667, Veracruz, México

² Laboratorio de Humedales y Sustentabilidad Ambiental, Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Tecnológico Nacional de México, Km. 1.8 Carretera a la Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

³ Facultad de Ingeniería / Universidad de Sucre, Carrera 28 No. 5-267, 700001 Sincelejo, Sucre, Colombia

* Autor de correspondencia: mayerli.sandoval24@gmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 4 de noviembre de 2025

Aceptado: 18 de diciembre de 2025

Publicado: 30 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.654>

Resumen: El aumento poblacional ha intensificado la presión sobre los recursos hídricos, provocando su sobreexplotación y contaminación. Este fenómeno ha reducido la disponibilidad de agua de calidad para distintos usos. En zonas rurales, esta problemática se agrava por la escasez de fuentes y la falta de sistemas de saneamiento, afectando tanto la salud pública como los ecosistemas. Una de las principales fuentes de contaminación en estos entornos son las aguas residuales domésticas generadas en cooperativas o cafeterías de instituciones educativas rurales, que, al no recibir tratamiento adecuado, deterioran el suelo y los cuerpos de agua. La carencia de infraestructura (falta de sistemas de drenaje en zonas rurales), el desconocimiento técnico y la falta de apoyo institucional profundizan esta situación, evidenciando una brecha en la gestión ambiental rural. No obstante, estas aguas contienen nutrientes como nitrógeno y fósforo, que pueden aprovecharse en la agricultura mediante tecnologías sostenibles. En este contexto, los humedales construidos se reconocen por su fácil operatividad, escalabilidad en contextos rurales, bajo costo y alta eficiencia en la eliminación de contaminantes de aguas residuales domésticas. Este estudio analiza el tratamiento descentralizado de las aguas residuales en instituciones educativas rurales para tratar y reutilizar aguas residuales en el riego agrícola, promoviendo la economía circular, la educación ambiental, la participación comunitaria en la gestión del agua y la autosuficiencia alimentaria en las escuelas rurales debido a que en estas instituciones es común el uso de huertos escolares y grandes extensiones de áreas verdes.

Palabras clave: Cooperativas instituciones rurales, humedal construido, infraestructura descentralizada

Introducción

El agua es un recurso vital que de manera natural es el más abundante en la Tierra. Sin embargo, a pesar de ser esencial para la vida en los ecosistemas, el crecimiento poblacional de los últimos años ha aumentado la presión sobre los recursos hídricos, produciendo su sobreexplotación y contaminación. Este fenómeno se traduce en una preocupante disminución de la disponibilidad de agua de calidad para los diferentes usos humanos, agrícolas e industriales (Álvarez-Álvarez *et al.*, 2024). Las regiones rurales por la escasez de sus fuentes hídricas y sus sistemas de saneamiento deficientes, aumentan los efectos de esta crisis, afectando tanto la salud pública como los ecosistemas locales.

Entre las fuentes de contaminación hídrica más frecuentes en el medio rural se encuentran, las aguas residuales domésticas, particularmente aquellas generadas en cooperativas y cafeterías de instituciones educativas. Estos efluentes contienen materia orgánica, grasas y nutrientes que, al ser vertidos sin tratamiento adecuado, contribuyen a la degradación del suelo y de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Saldías & Rodríguez, 2025). En muchos planteles educativos rurales, los sistemas de tratamiento convencionales son ineficientes o inclusive inexistentes, debido al desconocimiento técnico, los costos elevados o la falta de acompañamiento institucional (Rodríguez, 2024). Esta situación, representa una fuente puntual de contaminación ya que las aguas residuales se descargan directamente en el entorno cercano a la escuela, generando un riesgo sanitario directo para la comunidad estudiantil. Estas particularidades hacen necesario un análisis diferenciado, ya que su manejo inadecuado puede impactar tanto la salud escolar como las prácticas agrícolas locales por la existente infraestructura sanitaria y gestión ambiental en comunidades rurales. Esta situación inclusive se agrava, si se suman problemas como la escasez de agua potable, sanitarios inadecuados e insumos para un correcto lavado de manos (Vazquez, 2024). A pesar de representar un problema, las aguas residuales también contienen nutrientes aprovechables como nitrógeno y fósforo, los cuales pueden transformarse en recursos útiles para la producción agrícola si se gestionan de manera adecuada (Echeverría *et al.*, 2024). Los Humedales Construidos emergen como una alternativa ecológica y de bajo costo para el tratamiento

descentralizado de aguas residuales. Estos sistemas ecotecnológicos simulan los procesos naturales de depuración mediante la interacción entre plantas, microorganismos y sustratos, logrando una alta eficiencia en la remoción de contaminantes y representa una simplicidad tecnológica que permite su implementación comunitaria, promoviendo la participación de estudiantes, docentes y personal de mantenimiento en su operación y cuidado (Zurita-Martínez & Sandoval-Herazo, 2024). De este modo, se fortalecen las capacidades locales, se fomenta la apropiación social del conocimiento y se contribuye a cerrar la brecha entre la gestión del agua y la educación ambiental en instituciones rurales.

Desarrollo

¿Qué son los humedales construidos?

Los humedales construidos son sistemas ecológicos de tratamiento que imitan las condiciones de humedales naturales en sus funciones de depuración de aguas, donde la depuración se produce mediante la combinación de las plantas acuáticas, los microorganismos, y los medios filtrantes como grava, arena, suelo, que en conjunto eliminan los contaminantes del agua mediante métodos fisicoquímicos (sedimentación, filtración, decantación, degradaciones químicas indirectas y adsorción química).

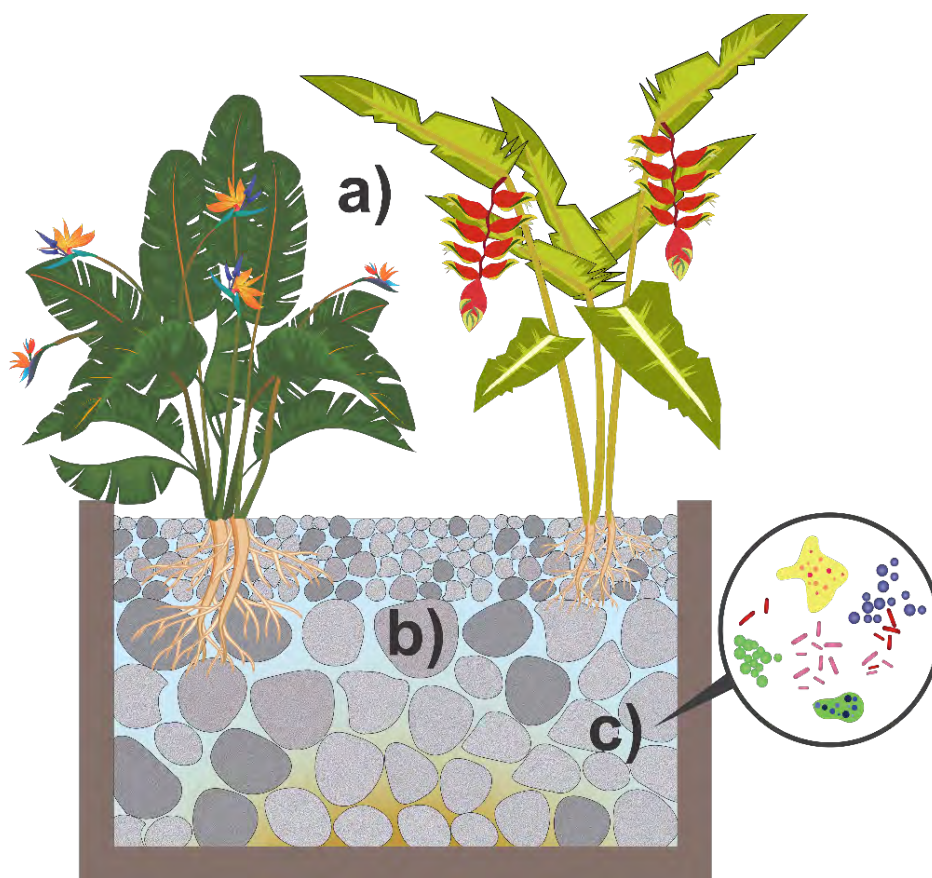


Figura 1. Principales componentes de un Humedal Construido: (a) vegetación, (b) medio filtrante y (c) microorganismos, modificado de (Zurita-Martínez & Sandoval-Herazo, 2024)

Según el diseño del sistema, se pueden clasificar de manera general como humedales de flujo superficial o subsuperficial (Figura 2), los cuales poseen características que se adaptan a las condiciones climáticas y socioeconómicas de la localidad (Roy *et al.*, 2025). Los Humedales Construidos pueden ser empleados para el tratamiento de aguas residuales domésticas, agroindustriales, industriales, son económicos, fáciles de implementar y operar, no necesitan energía para su funcionamiento y se integran al paisaje urbano y rural (Zurita-Martínez & Sandoval-Herazo, 2024). Como desventajas encontramos que para su construcción es necesario utilizar grandes superficies.

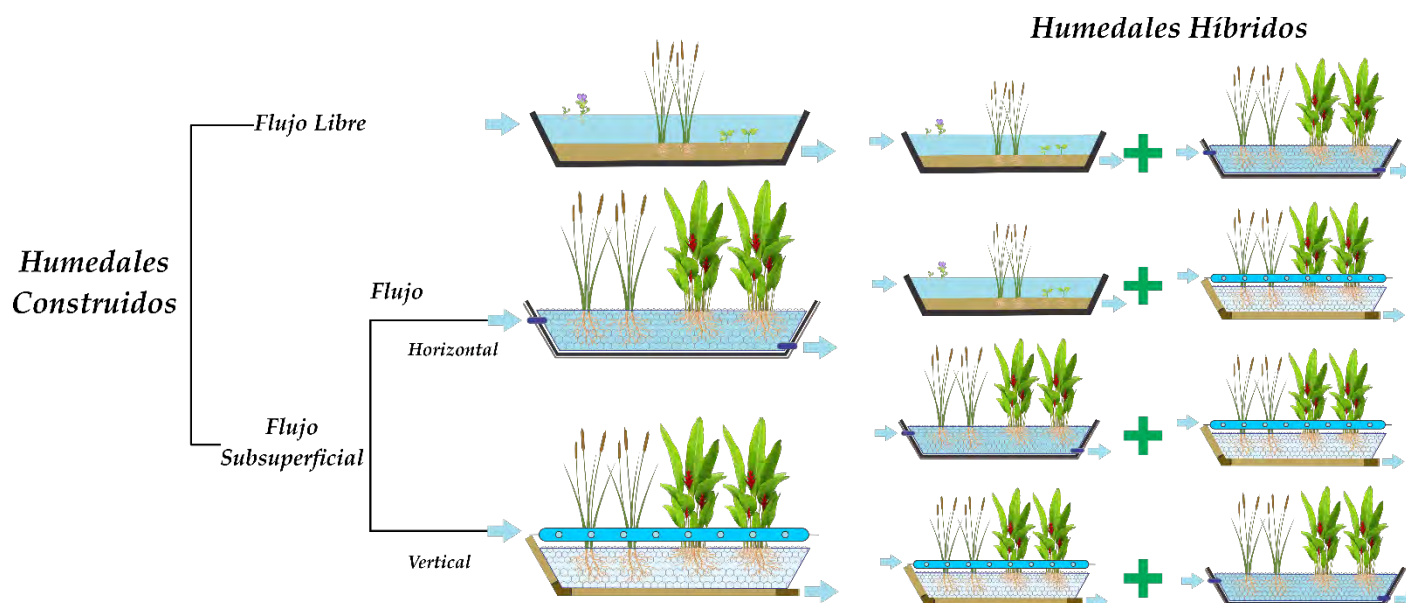


Figura 2. Clasificación de Humedales Construidos, modificado de (Zacarias *et al.*, 2025)

Su éxito en el contexto mexicano radica en su bajo coste de construcción y operación, la simplicidad del mantenimiento y su eficacia considerando la eliminación de contaminantes, tanto orgánicos como nutrientes.

Retos del agua en el sector rural

México vive una crisis hídrica progresiva por el crecimiento de la población, la expansión agrícola y la contaminación de los cuerpos de agua. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) reporta que más del 40 % de la población rural no tiene sistemas de saneamiento, lo que repercute negativamente en la calidad ambiental y en la salud pública (CONAGUA, 2023).

En el ámbito educativo, muchas escuelas rurales cuentan con cooperativas escolares que generan aguas residuales provenientes de cocinas, lavaderos y sanitarios que, al no recibir tratamiento, contaminan los suelos y cuerpos de agua cercanos. El manejo de las aguas residuales de las cooperativas escolares en localidades rurales, es un reto ambiental y social que pone de manifiesto las desigualdades debido a las infraestructuras sanitarias y el acceso al agua, los sistemas de tratamiento convencionales son insuficientes o inexistentes (Moore *et al.*, 2025).

Estas situaciones han impulsado diversos estudios e iniciativas que buscan soluciones sostenibles y adaptadas a las condiciones locales, tales como la implementación de Humedales Construidos (Jerez, 2024). En la Tabla 1, se puede visualizar estudios en los que se evidencia que los Humedales Construidos implementados como sistemas de tratamiento descentralizados en cooperativas de instituciones educativas rurales. Estos sistemas demuestran ser eficientes en la depuración del agua, permiten el cumplimiento de la normatividad vigente para el reúso de aguas en riego de áreas verdes o para la agricultura, así mismo se evidencia la formación ambiental en el ámbito escolar.

Estas experiencias internacionales pueden ser usadas como referencia para cooperativas escolares rurales mexicanas, que pretenden impulsar la educación ambiental, el ahorro de agua y la producción sostenible a partir de soluciones basadas en la naturaleza. La mayoría está orientada al tratamiento de aguas residuales procedente de lavamanos, duchas y lavanderías escolares o aguas residuales domésticas escolares asumidas posteriormente en actividades no potables.

Tabla 1. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales escolares

Tipo de humedal	Agua tratada	Tipo de vegetación	Reúso del agua	País	Referencia
Humedal de flujo subsuperficial horizontal (piloto)	Aguas residuales domésticas escolares, incluye aguas negras y grises.	<i>Ruellia brittoniana</i> , <i>Pennisetum setaceum</i>	Riego de jardines, huertos escolares y áreas recreativas	México	(Reynoso <i>et al.</i> , 2021)
Humedal híbrido de flujo horizontal y vertical (piloto)	Aguas grises y aguas residuales domésticas escolares	<i>Typha latifolia</i>	Riego de áreas verdes, jardines educativos	Zimbabue	(Alufasi <i>et al.</i> , 2024)
Humedal híbrido de flujo vertical y horizontal híbrido	Aguas residuales de baños, lavamanos y lavandería escolares	<i>Typha latifolia</i> , <i>Cyperus papyrus</i> , <i>Scirpus cyperinus</i> , <i>Canna indica</i>	Riego de huertos escolares y mantenimiento de jardines; uso pedagógico como aula viva	Cuba	(García <i>et al.</i> , 2024)
Humedales construidos	Aguas residuales cafetería	<i>Hymenocallis littoralis</i> , <i>Chlorophytum comosum</i> , <i>Duranta erecta</i>	Riego de jardines y áreas recreativas	India	(Dhaduti <i>et al.</i> , 2025)

En México, el Humedal Construido en el IT Boca del Rio, tiene 7 celdas de tratamiento con un caudal de 31.50 m³/d, en una superficie de construcción de 157 m². Esta capacidad es suficiente para una población de 3000 personas. Los parámetros monitoreados demuestran que el Humedal Construido cumple con los requerimientos que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997 cumpliendo con los límites establecidos para el reúso agrícola (Vazquez, 2024). Otros sistemas como humedales construidos en África mostraron viabilidad técnica, económica y ambiental sobre el tratamiento de aguas residuales, pero con relación a la absorción de contaminantes y la oxigenación del agua, demuestran que la vegetación en humedales escolares juega un rol clave para la remoción de materia orgánica y de fósforo. Zimbabue ha promovido la realización de un aprendizaje activo sobre el ciclo del agua y la gestión responsable de los recursos hídricos (Alufasi *et al.*, 2024). Todas estas experiencias han evidenciado cómo la educación ambiental, la participación de los estudiantes y la innovación tecnológica confluyen en una propuesta de solución a los problemas que producen las aguas residuales en contextos escolares rurales y urbanos (Bautista *et al.*, 2025). El tratamiento de aguas residuales en la escuela no representa solo un tema técnico, sino también una oportunidad educativa para mejorar la toma de conciencia en torno al agua. La implementación de humedales construidos en este tipo de contexto se convierte en una acción educativa, ecológica y demostrativa, que permite que los estudiantes tengan la oportunidad de participar activamente en el control, mantenimiento y evaluación del sistema, lo que posibilita el fortalecimiento de su conciencia ambiental y el entendimiento acerca de los procesos naturales de tratamiento. Las instituciones educativas rurales que implementan sistemas de tratamiento con participación de la comunidad educativa son entornos claves para inculcar valores ambientales y crear una conciencia sobre el uso y el manejo de aguas residuales (Sacoto *et al.*, 2025). Cada cooperativa e institución educativa puede convertirse en un ejemplo de cambio cuando enseña a sus estudiantes que el agua, incluso la que desechamos, puede tener un nuevo uso si se maneja correctamente.

Reúso del agua tratada en agricultura

El reúso de aguas purificadas en el sector agrícola posibilita el aprovechamiento de los nutrientes que contiene el efluente tratado, permitiendo así reducir el uso de fertilizantes químicos. Las cooperativas escolares pueden realizar el riego de huertos didácticos, áreas verdes y cultivos de hortalizas a partir del reúso de aguas tratadas dentro de la propia cooperativa para reiniciar el ciclo del agua. La FAO sostiene que el reúso seguro del agua tratada en la agricultura puede disminuir hasta en un 25 % el uso de agua dulce en comunidades rurales, pero también fomenta la seguridad alimentaria (FAO, 2020). México ha sido pionero en el reúso de el agua residual y tratada (Cisneros Estrada, 2018),

Bolivia utilizó como base la NOM-003-SEMARNAT-1997 para las restricciones en cuanto a cultivos que es posible regar de acuerdo con la calidad del agua (Figura 3).

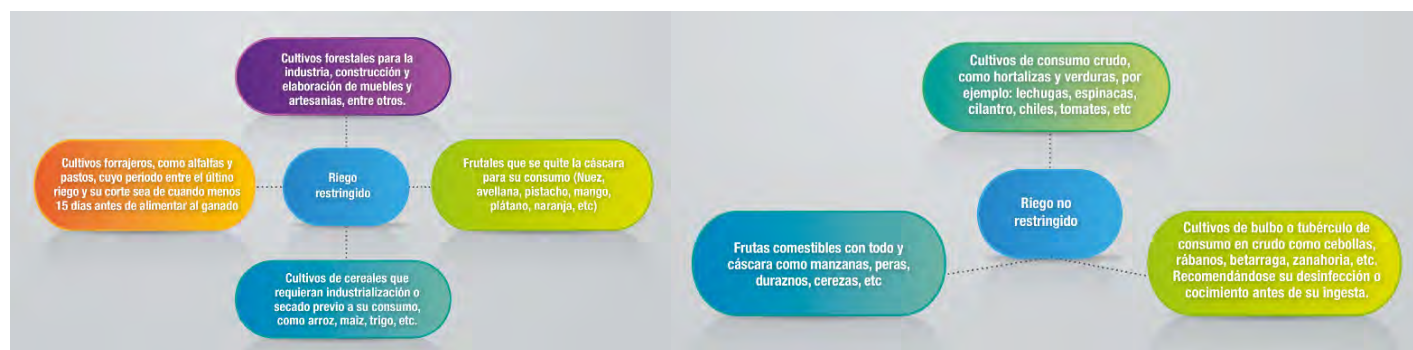


Figura 3. Tipos de riego según la calidad del agua para usos agrícolas (Cisneros Estrada, 2018)

Además, en el caso del estado de Veracruz, se ha visto que el reúso de aguas en humedales construidos mejora la productividad del suelo y también fomenta la conservación del microbiota del suelo (Melgarejo Galindo *et al.*, 2025).

Conclusiones

Los humedales construidos representan una alternativa tecnológica apropiada, sostenible y pedagógica para el tratamiento de aguas residuales en cooperativas escolares rurales de México. Su implementación ofrece beneficios ambientales y sociales, al reducir la contaminación local, facilitar el reúso agrícola del agua y fortalecer la educación ambiental comunitaria. El aprovechamiento del agua tratada para riego en huertos escolares no solo optimiza los recursos hídricos, sino que también promueve una agricultura educativa sostenible, que contribuye a la formación de generaciones comprometidas con el cuidado del ambiente. En el contexto mexicano, impulsar el uso de humedales construidos en el ámbito educativo rural es una oportunidad para vincular el conocimiento científico con la acción comunitaria, avanzando hacia modelos de gestión del agua más resilientes, inclusivos y sustentables.

Bibliografía

- Cisneros Estrada, X. (2018). *Guía técnica para el reúso de aguas residuales en la agricultura*. Ministerio de Medio Ambiente y Agua. Recuperado de <http://www.mmaya.gob.bo>
- Alufasi, R., Parawira, W., Zvidzai, C. J., Stefanakis, A. I., Musili, N., Lebea, P., Chakauya, E., & Chingwaru, W. (2024). Performance evaluation of a pilot-scale constructed wetland with *Typha latifolia* for remediation of domestic wastewater in Zimbabwe. *Water*, 16(19), 2843. <https://doi.org/10.3390/w16192843>
- Álvarez-Álvarez, M. J., Moreno-Ponce, L. A., & Regalado-Jalca, J. J. (2024). Impacto ambiental asociado a factores antropogénicos: Incidencia en la economía de las cuencas hidrográficas. *MQR Investigar*, 8(4), 2158–2180. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.4.2024.2158-2180>
- Bautista, J. I. Q., Campos, L. C., Trejos, B., & Bogush, A. (2025). Exploring rural school students' perceptions, willingness, motivations, and concerns regarding greywater treatment and reuse in southern Peru. *Sustainable Environment*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/27658511.2024.2440960>
- Comisión Nacional del Agua. (2023). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. CONAGUA.
- Dhaduti, M., Dhaduti, S., Budapanahalli, S., Kadabnakatti, S., & Hubballi, S. (2025). Treatment of college canteen sullage using microcosm phytoid system. *Acta Periodica Technologica*, 56, 187–196. <https://doi.org/10.2298/APT250410013D>
- Echeverría, I., Aliaga, G., & Saavedra, O. (2024). Evaluación de calidad de agua residual tratada para riego en el Valle Alto de la ciudad de Cochabamba. *Revista Investigación & Desarrollo*, 24(1), 35–45. <https://doi.org/10.23881/idupbo.024.1-3i>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *The state of food and agriculture 2020*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- García, M. B., Álvarez, P. P., & García, Y. L. (2024). Propuesta de tratamiento de residuales domésticos mediante humedales artificiales en comunidades rurales. Centro de Medio Ambiente y Desarrollo. Recuperado de <https://cmad.ama.cu>
- Jerez, M. J. H. (2024). *Servicio circular polifuncional de tratamiento de aguas rural: Sistema de humedales construidos como infraestructura medioambiental para Lo Abarca* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://doi.org/10.7764/tesisUC/ARQ/88323>
- Melgarejo Galindo, L., Melgarejo Galindo, D., & López Barradas, M. (2025). Clasificación y reutilización del agua como estrategia de cuidado ambiental en el ámbito social y empresarial. *Anuario de Ciencias Sociales*, 5(5), 76–88. <https://doi.org/10.20983/acs.2024.1.6>
- Moore, N., Pousty, D. S., Ma, D., Hofmann, R., Pras, A., Higbee, R. E., Mamane, H., & Beck, S. E. (2025). Decentralized UV disinfection systems in rural areas or low-resource contexts: A case study compilation. *Environmental Science: Water Research & Technology*. <https://doi.org/10.1039/D4EW00822G>

- Reynoso, F. L., Del Moral, M., & Castañeda Chávez, R. (2021). Humedal artificial para tratamiento de aguas residuales del Instituto Tecnológico de Boca del Río: Escalamiento. *Foro Virtual "El Uso Adecuado del Agua Residual y Otras Medidas para Mitigar la Escasez de Agua en Tiempo de Sequía"*, 59, 968–987.
- Rodríguez, M. de los Á. M. (2024). Aspectos generales para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(4), 12011–12024. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13378
- Roy, M. B., Saha, S., & Kumar Roy, P. (2025). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Ecology, Economy and Society – The INSEE Journal*, 8(1), 13–54. <https://doi.org/10.37773/ees.v8i1.1281>
- Sacoto, E. C. A., Ullauri Bermeo, C. P., Zea Cobos, A. G., Sánchez Dumas, J. S., Chaca Cordero, V. A., Parra Segovia, S. K., Cisneros Jerves, F. E., Pesántez Yépez, M. E., & Vega Medina, J. I. (2025). *Reinventar la ciudad: Soluciones verdes y equidad social para comunidades sostenibles*. SPUE. <https://doi.org/10.17163/abyaups.129>
- Saldías, C., & Rodríguez, M. (2025). Avances y desafíos del tratamiento descentralizado de aguas residuales en América Latina: Revisión sistemática 2013–2024. *Revista Investigación & Desarrollo*, 25(1), 5–20. <https://doi.org/10.23881/idupbo.025.1-1i>
- Vázquez, R. (2024). Ab-Revista de Abogacía. *Ab-Revista de Abogacía*, 15, 61–78. Recuperado de <https://www.unicef.org>
- Zacarías, M. A. P., Sandoval-Herazo, M., Adame-García, J., & Rivera, S. (2025). Humedales construidos: Un aliado para la conservación y el desarrollo sostenible. *PaCiencia Pa' Todos*, 17, 93–97. <https://publicaciones.aragon.unam.mx/ojs/index.php/paciencia/article/view/115>
- Zurita-Martínez, F., & Sandoval-Herazo, L. C. (2024). La tecnología de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 6–10. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.186>

Importancia del reconocimiento del valor económico de la vivienda sustentable en México

Gisela Guzmán-Macias *, Agustín Amador-Duran

Centro Universitario de Guadalajara de la Universidad de Guadalajara, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México

* Autor de correspondencia: Gisela.guzman@cugdl.udg.mx; Tel.: (33) 3322521988

Desarrollo Sustentable (Bioconstrucción)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 13 de agosto de 2025

Publicado: 30 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.520>

Resumen: A nivel mundial en los últimos años ha habido un incremento en el mercado inmobiliario de la construcción de proyectos de vivienda sustentable derivado del desarrollo de políticas enfocadas en la regulación del uso de los recursos naturales, modificando la visión de la economía mundial. Por esto es necesario que esta dinámica en el mercado inmobiliario se vea reflejada en un valor económico congruente con las características sustentables del bien, considerando los beneficios que ofrece al usuario, su entorno inmediato, la comunidad y el país en general. La presente investigación de tipo Cualitativa descriptiva interpretativa a través de una encuesta aplicada a una población de 20 expertos en áreas relacionadas con la sustentabilidad, permitió revisar el protagonismo de la estimación del valor monetario con un resultado del 80% en total acuerdo y un 20% solo en acuerdo, el cual se adquiere no solo dentro del mercado inmobiliario sino a otros niveles para beneficio social, ecológico y económico, haciendo necesario dar a conocer las ventajas que la sustentabilidad aplicada a la edificación puede traer y que los procesos y normas de valuación que actualmente existen deben de ser más específicos para la estimación del valor económico de estos bienes. Ante los resultados de un 100% de la población encuestada, a favor de que la incorporación y valuación de los elementos sustentables, proporcionan un aumento de valor y la futura ampliación de este tipo de vivienda en el mercado, a través del reconocimiento monetario, esto nos ayuda a entender su importancia y maximizar los alcances a nivel nacional con la recomposición de gastos en materia de salud y energía.

Palabras clave: Eco tecnologías, vivienda sustentable, Valor económico, bioconstrucción

Importance of recognizing the economic value of sustainable housing in Mexico

Abstract: The trend of a change in awareness in society regarding the care of our natural environment is a latent reality, in parallel the governments of several countries have joined together with a common goal, to develop policies focused on the regulation of the use of natural resources, modifying the vision of the global economy, the real estate market is not alien to this transformation, a worldwide increase in the construction of sustainable housing projects can be observed. For this reason, it is necessary that this dynamic in the real estate market be reflected in an economic value consistent with the sustainable characteristics of the property, considering the benefits it offers to the user, their immediate environment, the community and the country in general. This qualitative descriptive interpretive research through a survey applied to a population of 20 experts in areas related to sustainability, allowed to review the importance of the estimation of monetary value with a result of 80% in total agreement and 20% only in agreement, which is acquired not only within the real estate market but at other levels for social, ecological and economic benefits, making it necessary to publicize the advantages that sustainability applied to construction can bring and that the valuation processes and standards that currently exist should be more specific for the estimation of the economic value of these assets. Given the results of 100% of the surveyed population in favor of the incorporation and valuation of sustainable elements, providing an increase in value and the future expansion of this type of housing in the market, through monetary recognition, this helps us understand its importance and maximize the scope at the national level with the recomposition of expenses in health and energy.

Keywords: Eco-technologies, sustainable housing, economic value, bioconstruction

Introducción

El cambio climático y la degradación ambiental han puesto en evidencia la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y de utilizar de manera responsable y eficiente los recursos naturales. Brundtland (1987), afirmó que los graves problemas ambientales mundiales se debían principalmente a la enorme pobreza del Sur y a los patrones no sostenibles, por esta razón en la actualidad la construcción tradicional y el funcionamiento de las viviendas, son considerados elementos centrales de esta problemática ambiental, conforme a la agenda 2030 aprobada por la ONU en el 2015, la cual establece 17 objetivos de desarrollo sostenible entre los que destaca el eje 11, de ciudades y comunidades sostenibles, es una misión trascendental la búsqueda activa de soluciones que ayuden a mitigar o reducir el deterioro al medio ambiente, convirtiéndose en un área de oportunidad para el ámbito inmobiliario.

A nivel mundial, como en México, se ha experimentado recientemente un crecimiento significativo en la construcción de viviendas con características sustentables, como lo menciona la CANADEVI (2024), motivado por las políticas públicas y tendencia a la conciencia ambiental, sin embargo las viviendas dotadas de eco tecnologías y sistemas sustentables, a menudo enfrentan dificultades para posicionarse en el mercado inmobiliario; Es aquí donde nace la importancia de contar con una estimación acertada y real del valor de este tipo de inmuebles, que nos permita entender su trascendencia económica, política, social y ecológica y que cumpla con la concepción real de la valuación de bienes entendiéndola como una ciencia aplicada que tiene como objetivo la determinación del valor de un bien, teniendo en cuenta los atributos o variables explicativas que lo caracterizan, (Aznar-Bellver, 2012).

Conforme a la IVS 103 (Consejo de Normas Internacionales de Valuación [CIV], 2025), actualmente en el campo de la valuación existen tres enfoques, el enfoque de valor de mercado, el enfoque físico y el enfoque de capitalización de rentas, dentro de los cuales existen diferentes métodos los más conocidos son el método de rentas, el método de costos, el método de mercado y método residual estático y dinámico, sin embargo ninguno de ellos analiza de manera objetiva, integral y específica cada uno de los valores económicos que estas eco tecnologías y sistemas sustentables aportan a los bienes, como lo mencionan Haro-Martínez y Taddei-Bringas (2014) en una investigación previa, dando como resultado una subvaloración de los inmuebles, por eso es importante encontrar y analizar las diferentes variables que le dan valor a estos bienes, revisarlos y establecer factores que permitan determinar su valor a través de las metodologías existentes y aprobadas por la reglamentación para su aplicación en México.

Las aplicación de una metodología adecuada para la valuación de este tipo de bienes, nos permite no solo estimar el valor real de un bien inmueble con características sustentables, sino también mejorar su apreciación y reconocimiento, estableciendo parámetros económicos que permiten medir la reducción de costos a nivel social, producidos a través del ahorro energético, al igual que el ahorro directo en los gastos familiares a través de los efectos de economía circular y la disminución en el consumo de energía, así como la generación de innovaciones en los proceso constructivos para que estos sean menos dañinos para el medio ambiente, todo esto a mediano y largo plazo se traduce en beneficios atmosféricos, salud y una economía más saludable.

La presente investigación tiene como objetivo principal demostrar la importancia que tiene el reconocimiento del valor monetario de la vivienda sustentable en México, como un elemento preponderante en el crecimiento y desarrollo económico del país a través del análisis de las tres dimensiones claves de la sustentabilidad.

Aportando información relevante sobre la importancia del reconocimiento del valor económico de este tipo de vivienda para coadyuvar a la comprensión de la relevancia del aumento de la edificación, para el mejoramiento del bienestar de la población en general, conforme a los beneficios que los sistemas pasivos traen consigo.

Diagnóstico de la situación actual

Desarrollo Sustentable

Conforme a lo que establecen las Naciones Unidas (2024), el desarrollo sustentable es la capacidad que ha desarrollado el sistema humano para satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer los recursos y oportunidades para el crecimiento y desarrollo de las generaciones futuras, con base en esta definición, se puede visualizar la importancia que tiene el tomar decisiones congruentes con la preservación de la sustentabilidad de la sociedad, es decir, que en el momento en que una sociedad sea más consciente y responsable del impacto que puede generar a su entorno, podrá garantizar un crecimiento y desarrollo más positivo, amigable sin deterioro del medio ambiente.

Dimensiones de la Sustentabilidad

Existen diferentes ejes de sustentabilidad, los cuales ayudan a definir y direccionar los esfuerzos e importancia de su aplicación, así como su medición. CEPAL (2021), equilibra la sustentabilidad en tres dimensiones: La ecológica, La económica, La social.

Estas tres dimensiones o ejes se encuentran firmemente ligados entre sí, es decir las tres no pueden separarse y analizarse de forma aislada, por ejemplo, si se fomenta a través de la implementación de nuevas políticas públicas la construcción de arquitectura bioclimática, tendremos beneficios ecológicos por la reducción de emisiones de gases y ahorro energético, lo cual se traduce en reducción de gastos a nivel económico tanto para el país como para el usuario directo de este tipo de bienes, pero esto no queda ahí, es una línea de beneficios sociales a través del mejoramiento en la calidad de vida, más salud para la población, menos enfermedad respiratorias, cardiovasculares, infecciosas, psicosociales, cáncer entre otras, ocasionadas por el aumento de contaminación y el efecto invernadero.

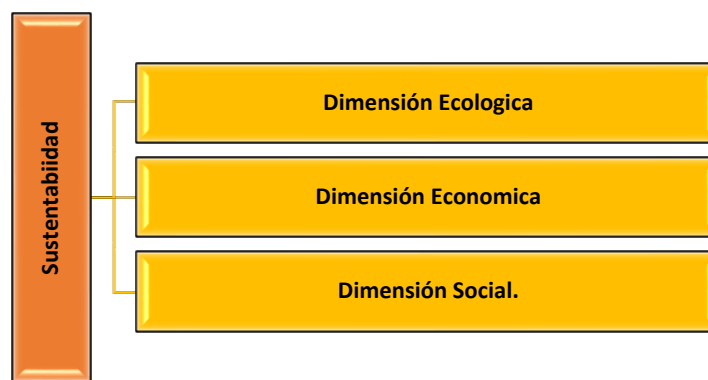


Figura 1. Eco tecnologías (Elaboración propia)

Indicadores de sustentabilidad

Para el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2000), los indicadores de sustentabilidad en México expresan en cierto nivel y magnitud las interrelaciones entre el desarrollo socio-económico y los fenómenos ecológico-ambientales.

Es importante conocer la relación que existe entre la sustentabilidad, el aspecto social, ecológico y la economía, es decir el impacto relacionado con los costos que conlleva la implementación de los distintos sistemas sustentables en favor de la sociedad como grupo y como elementos que la integran, y a su vez los beneficios económicos atribuibles a los ahorros que se han generado, dicho de otra manera, la relación existente entre el costo y el beneficio de masas y a nivel individual, por ese motivo se establecen parámetros o criterios que puedan medir el nivel de sustentabilidad y a su vez al valor económico que esta genera, estos indicadores básicos que permiten delimitar la sustentabilidad ambiental pueden ser agrupados de la siguiente forma: Huella ecológica, Huella de carbono, Huella hídrica, Huella social.

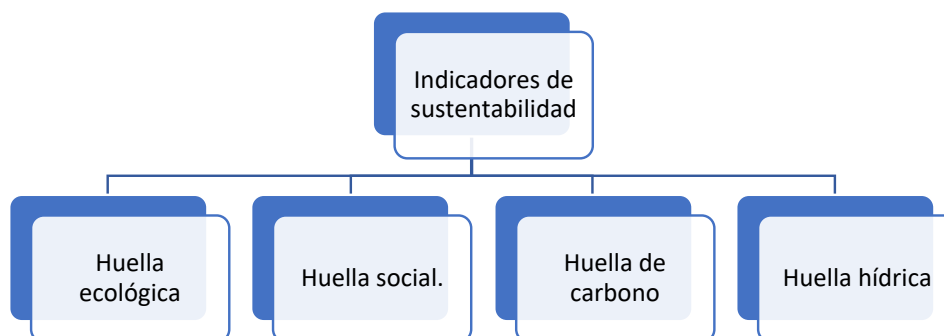


Figura 2. Indicadores Sustentabilidad (UICN, 2021)

Materiales y Métodos

La metodología implementada se basó en el enfoque cualitativo, bajo una investigación de tipo descriptiva interpretativa ya que esta permite medir evaluar o recolectar datos sobre diversos conceptos (variables) aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno a investigar (Hernández Sampieri *et al.*, 2003), lo que permitirá exponer la Importancia que tiene el valor económico de la vivienda sustentable en México, haciendo énfasis en que es relevante una apropiada selección de la metodología valuatoria, para la estimación del valor, esto visto como un fenómeno social, ecológico y económico bajo el análisis de las experiencias y significados en la perspectiva de especialistas en las áreas involucradas.

El estudio tiene como instrumento principal un cuestionario, el cual fue aplicado a una población objetivo de 20 especialistas en materia de sustentabilidad, del sector inmobiliario específicamente de vivienda sustentable, sociólogos, economistas y ecologistas, la selección se realizó bajo un criterio de muestreo intencional, donde se dividieron en 5 grupos de 4 especialistas conforme a las áreas mencionadas anteriormente, lo que nos permitió ver si realmente es trascendental o no, tener un conocimiento sobre la estimación de valor económico de este tipo de bienes, así como revisar su relevancia y si la metodología actual es funcional o no.

Previo a la aplicación y diseño del instrumento aplicado, se efectuó una investigación sobre elementos preponderantes del ámbito de la sustentabilidad, la vivienda sustentable y la valuación inmobiliaria, a fin de tener una visión global y actualizada sobre estos tres puntos de referencia.

Inmuebles sustentables

La arquitectura sustentable es el diseño de edificios teniendo en cuenta las condiciones climáticas y el medio ambiente, aprovechando los recursos disponibles, como el sol, la vegetación, lluvia, la dirección del viento para reducir el impacto ambiental de los edificios (Ceballos Pérez, 2020).

Los beneficios de la edificación de arquitectura sustentable están bien documentados. El US Green Building Council (USGBC5), calcula que actualmente la edificación sustentable reduce, en promedio, 30% del consumo de energía, el 35% de las emisiones de carbono y del 30% al 50% del consumo de agua, además de generar ahorros del 50% al 90% en el costo de los desechos. Así mismo, la edificación sustentable contribuye al fomento de comunidades más sólidas y produce importantes beneficios para la salud humana y la productividad.

La importancia de la vivienda bioclimática se centra en: “Limitar el tener que recurrir a sistemas mecánicos de calefacción o climatización, por medio de la utilización con acierto de los recursos que la naturaleza nos ofrece”. (Támez, 2006).

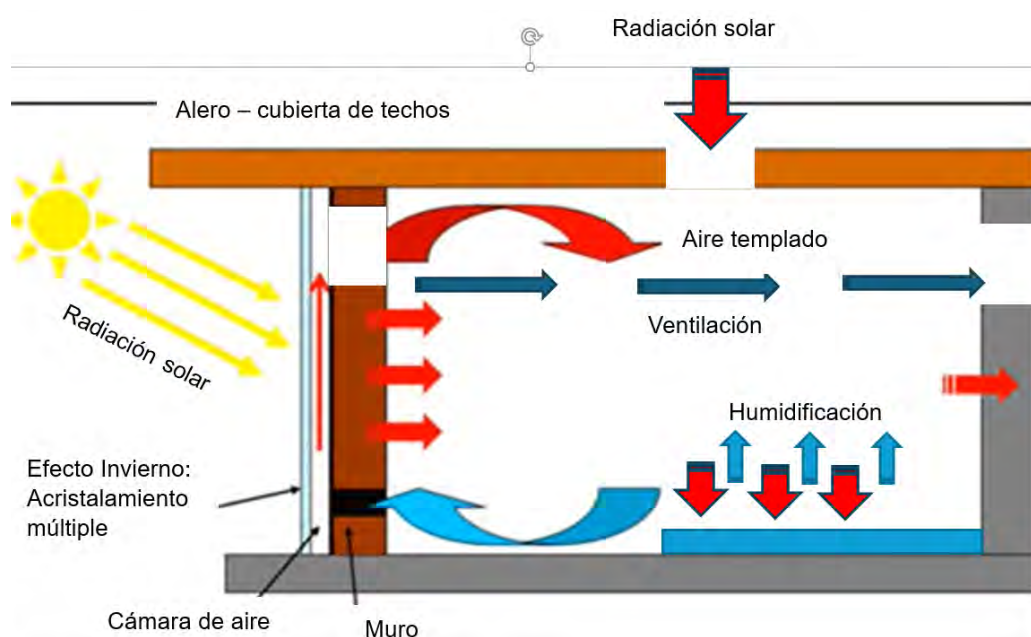


Figura 3. Sistemas pasivos (Elaboración propia)

Eco tecnologías

Las eco tecnologías obedecen a un contexto socioeconómico muy específico, proporcionando beneficios particulares relacionados directamente con su aplicación ecológica, por este motivo es que las tecnologías ecológicas existentes no necesariamente pueden ser las más apropiadas en un proyecto con características muy específicas. Conforme a la CONAVI, las eco tecnologías se pueden integrar en los siguientes cinco grupos: Agua, Drenaje, Energía, Gas y Envoltorio (Comisión Nacional de Vivienda, 2024).



Figura 4. Eco tecnologías (Elaboración propia)

Sistemas pasivos

Se denominan sistemas pasivos a todos aquellos agregados al edificio, constituidos o incorporados desde el diseño del proyecto los cuales nos ayudaran a captar, reconocer, almacenar y repartir los aportes de energía natural, sin intervención de ninguna fuente convencional de energía. La implementación de estos sistemas pasivos en los bienes inmuebles, permite dotar de niveles de confort apropiados al usuario, se dividen de manera básica en los siguientes: Sistema pasivo de calefacción solar, Sistema pasivo de enfriamiento y Sistema pasivo de humidificación.

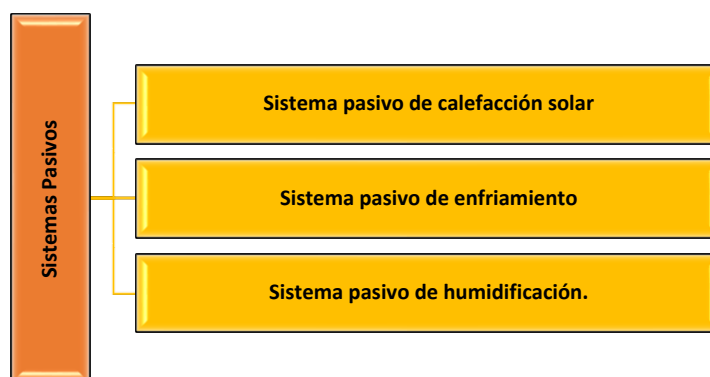


Figura 5. Eco tecnologías (Elaboración propia)

Valuación de inmuebles sustentables

La valuación sostenible es un proceso multifacético que depende de indicadores ambientales, sociales y económicos y metodologías de valuación adecuadas, por esta razón es importante delimitar los indicadores en materia de sustentabilidad, así como considerar la implementar de las metodologías de valuación existentes basadas en los principios de valor, con el objetivo de determinar de una manera más objetiva la estimación de valor del inmueble.

Valor de mercado de inmuebles sustentables

Señalan Isunza Vizuet y Dávila González (2013), que en México el uso de eco tecnologías, ha mejorado las características de sustentabilidad de las viviendas, pero también las encarecen, por lo que quedan fuera de las posibilidades de más del 45% de la población. Basados en esta información, podemos identificar que la implementación de la sustentabilidad y las eco tecnologías no garantizan que el bien inmueble sea competitivo en un mercado inmobiliario, impactando directamente al comportamiento de los valores de los inmuebles sustentables, motivo por el cual es importante diferenciar de manera objetiva la características sustentables del bien inmueble, con la finalidad de diferenciar y estimar el valor económico de manera precisa y sustentada, lo cual posiciona al inmueble en un mercado que valore sus beneficios.

Impacto del valor de inmuebles sustentables

Datos del Reporte Inmobiliario de Lamudi (2021), indican que un proyecto arquitectónico sustentable aumenta en 31.6% las posibilidades de venta, en la publicación: “Ventajas de una vivienda sustentable” El Financiero, indica que este tipo de construcciones reduce costos de mantenimiento hasta en 60%, y su plusvalía se incrementa en 5%, estos indicadores de comportamiento del mercado inmobiliario sustentable, nos reflejan una tendencia positiva en el posicionamiento de los bienes inmuebles, así como la percepción del usuario, ya que el ahorro que la sustentabilidad puede generar en un proyecto lo ve reflejado en su economía, incentivando al mercado inmobiliario a mejorar el posicionamiento de estos inmuebles; Basado en estos datos porcentuales y en el comportamiento del mercado inmobiliario sustentable, se puede observar la necesidad de que las metodologías de valuación y sus distintos procedimientos técnicos, consideren la implementación de indicadores que ayuden a determinar el impacto al valor de inmueble sustentable.

Instrumento

Como se menciona anteriormente el instrumento fue una encuesta conformada por diez reactivos, aplicados bajo la escala de Likert, para poder conocer el grado de conformidad o desacuerdo con las premisas presentadas, a continuación, se muestran los reactivos:

1. ¿Consideras que una vivienda con elementos sustentables adquiere más valor económico que una vivienda que no tiene estas características?
2. ¿Crees que es importante reconocer el valor de la vivienda sustentable en México a efecto de aumentar la construcción de este tipo de bienes?
3. ¿Crees que la aplicación de sistemas pasivos, así como eco tecnologías y elementos sustentables en una vivienda mejora la calidad de vida de los actuantes?
4. ¿Consideras importante la generación de nuevas políticas públicas que propicien la construcción de vivienda sustentable?
5. ¿Piensas que la expansión de la edificación de vivienda sustentable en México traería beneficios ecológicos y ambientales a nuestro país a mediano y largo plazo?
6. ¿Consideras que el habitar en un espacio que cuenta con sistemas pasivos y eco tecnologías es un elemento preponderante para mejorar el estado de salud físico y mental?
7. ¿Crees que, si se bajan los consumos de energía y uso de materiales tóxicos y dañinos para el medio ambiente, así como se aumenta el aprovechamiento de la energía solar y eólica existiría una mejora económica en nuestro país?
8. ¿Conforme a su experiencia, considera relevante la existencia de una metodología valuatoria específica para la estimación del valor de vivienda sustentable?
9. ¿Crees que el desconocimiento de las ventajas que provee la construcción de la vivienda sustentable es lo que ocasiona la baja demanda de la misma?
10. ¿Consideras que si se exponen las ventajas económicas, sociales y ecológicas que tienen este tipo de viviendas, aumentaría su construcción?

La categoría de respuestas fue la siguiente: Totalmente de acuerdo = 5, de acuerdo = 4, indiferente = 3, en desacuerdo = 2 y totalmente en desacuerdo = 1.

La encuesta se realizó de forma presencial durante el periodo de febrero y abril del 2025.

Resultados y Discusión

De acuerdo con los resultados de la encuesta aplicada a especialistas de los diversos campos que componen las dimensiones de la sustentabilidad, se buscó evaluar el reconocimiento del valor monetario de la vivienda sustentable en México, tal como plantea el objetivo de esta investigación. Se recopilaron datos que permitirán determinar si realmente se considera valioso este tipo de bienes, así como analizar la existencia de beneficios que generen valor a futuro. Dichos beneficios se relacionan no solo con factores sociales y ecológicos, sino también con el impacto económico, tanto a nivel individual o familiar como a escala nacional.

Resultados de la encuesta

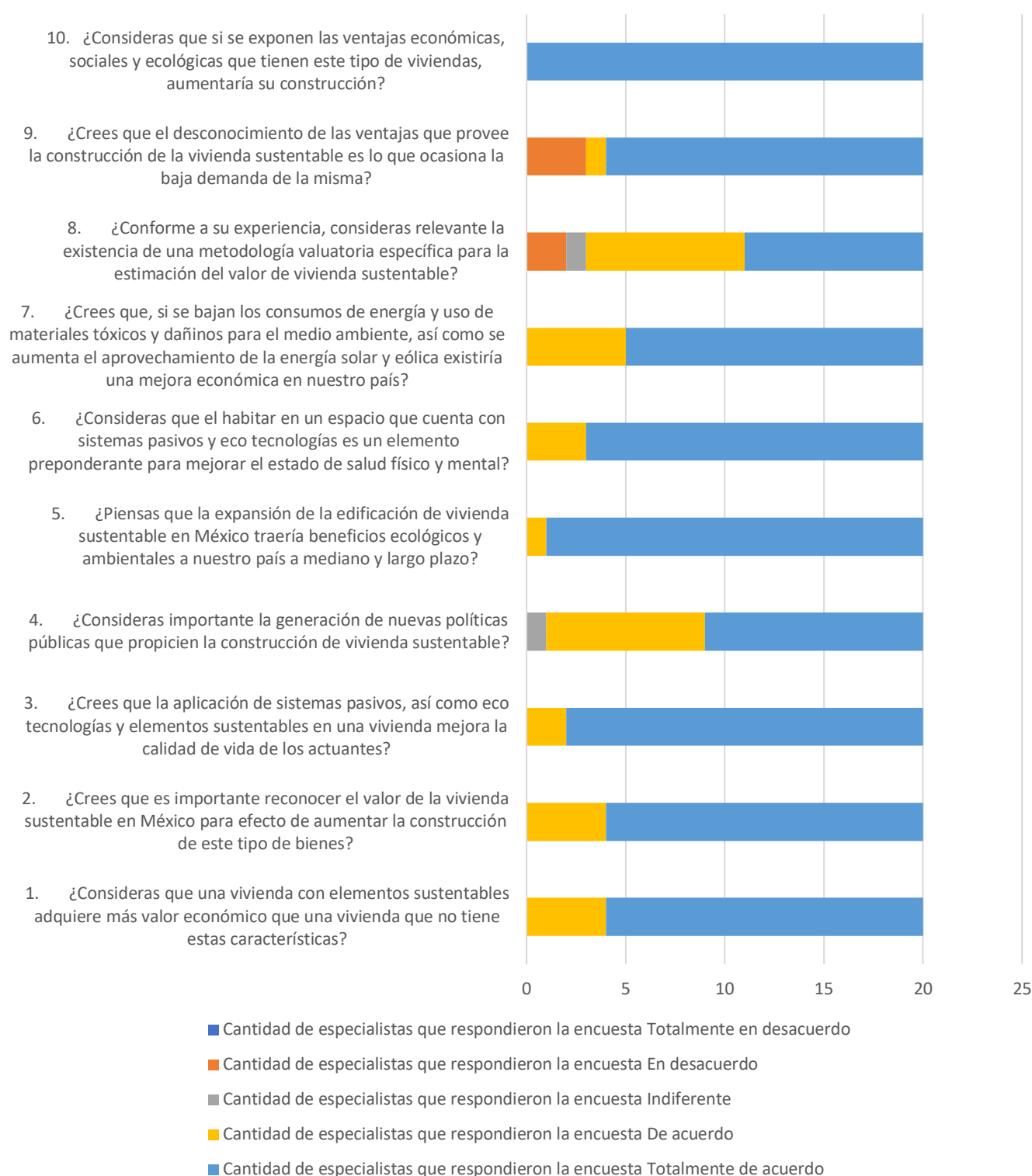


Figura 6. Resultados de la encuesta (Elaboración propia)

Los resultados reflejan algo muy claro: la mayoría de las personas tiene una visión positiva sobre las viviendas sustentables, aunque todavía hay obstáculos que frenan su adopción.

En lo que respecta a la percepción del valor, prácticamente todos los encuestados reconocen que una vivienda con sistemas pasivos y ecotecnologías vale más que una convencional. Este consenso muestra que la idea de “valor agregado” por las mejoras sustentables ya está instalada en la mente de las personas. Sin embargo, este reconocimiento no siempre se traduce en que se construyan más; conocer el valor es importante, pero no parece ser el único factor que impulsa la demanda.

Cuando se les preguntó sobre la importancia de dar a conocer ese valor, ocho de cada diez respondieron que es fundamental para fomentar la construcción de estas viviendas. Esto nos dice que la comunicación y la educación sobre sus beneficios económicos son piezas clave para que el mercado crezca.

En cuanto a la calidad de vida, nueve de cada diez personas ven en estos sistemas una mejora importante para su bienestar. No se trata solo de ahorrar en gastos, sino de vivir en un espacio más confortable y saludable. Aun así, hay un pequeño grupo que no lo percibe con tanta fuerza, lo que abre la oportunidad de mostrar con más evidencia cómo estos beneficios se materializan en el día a día.

El tema de las políticas públicas genera opiniones más diversas. Un poco más de la mitad cree que deberían impulsarse nuevas políticas que favorezcan este tipo de construcciones, pero el apoyo no es tan abrumador como en otras preguntas. Eso sí, cuando se habla de beneficios ambientales, casi todos coinciden: el 95% ve en la expansión de estas viviendas una ganancia clara para el medio ambiente.

La salud es otro argumento fuerte. Ocho de cada diez encuestados creen que estos sistemas ayudan a mejorar la salud física y mental, un vínculo que merece más atención en campañas de promoción y en la planeación de proyectos habitacionales.

En el plano económico, tres de cada cuatro participantes consideran que reducir el consumo de energía y materiales contaminantes, y aprovechar energías limpias como la solar o la eólica, podría mejorar la economía del país. Este punto demuestra que la sustentabilidad no es vista únicamente como un asunto ambiental, sino también como una oportunidad de desarrollo económico.

La pregunta sobre la existencia de una metodología de valuación específica tuvo respuestas más divididas. Mientras que el 45% está completamente de acuerdo en que es necesaria, un 40% solo coincide parcialmente y un pequeño grupo no la considera relevante. Esto deja ver que, aunque el interés existe, todavía falta claridad y confianza en cómo implementar este tipo de herramientas.

Sobre las barreras para la construcción, la mayoría cree que el principal problema es el desconocimiento de los beneficios, aunque un sector no menor señala que el verdadero obstáculo es el costo inicial. Este punto es importante: incluso quienes reconocen que a largo plazo hay un ahorro, ven en el gasto inicial una barrera difícil de superar. Aquí es donde entran en juego las opciones de financiamiento y modelos de pago que hagan más accesible la inversión.

Finalmente, el punto con mayor unanimidad fue la difusión de las ventajas económicas, sociales y ecológicas. El 100% está convencido de que, si estas se comunican mejor, la construcción de viviendas sustentables aumentará. Este hallazgo confirma que la información clara y bien transmitida puede ser el motor más poderoso para que más personas apuesten por este tipo de vivienda.

Discusión

Con base en la revisión teórica y la investigación de campo efectuada para efecto de entender la trascendencia de reconocimiento del valor monetario de la vivienda sustentable en México, es posible destacar que las nuevas políticas y demandas a nivel global hacen latente la necesidad de conocer este valor a través de una adecuada metodología valuatoria que permita la estimación del valor económico real y de acuerdo a los elementos y beneficios presentes y futuros a nivel social, ecológico y político, tanto de forma individual, familiar, comunitario y por supuesto como país, contemplando beneficios globales.

Básicamente el significado de los hallazgos encontrados permite satisfacer el objetivo planteado durante la presente investigación, dejando claro que, si es importante demostrar la relevancia que tiene el reconocimiento del valor monetario de la vivienda sustentable en México, como un elemento preponderante en el crecimiento y desarrollo económico del país a través del análisis de las tres dimensiones claves de la sustentabilidad, la parte social, ecológica y económica.

Esto es posible lograrse a través de la adecuada selección de la metodología valuatoria para efecto de obtener una estimación económica acertada e integral que cuente con los factores de homologación de acuerdo a las eco tecnologías, sistemas pasivos y sus beneficios a corto y largo alcance, en un primer nivel (personal y familiar), en un segundo (comunidad) y tercer nivel (global), tanto de forma económica activa a través del aumento del valor presente de una propiedad y a futuro bajo dos visiones esenciales conforme a las teorías investigadas: aumento del valor de la propiedad en el tiempo conforme a sus beneficios inherentes y físicos, con el respectivo ahorro derivado de los elementos sustentables y como segunda visión el ahorro económico que estas propiedades generaran a la sociedad en general a través del uso de sistemas pasivos y ecológicos mejorando no solo al medio ambiente, sino con ello la salud pública y la economía del país con la reducción de gastos en los sistemas de salud pública por enfermedades crónico degenerativas de orden metabólico, ocasionadas por el exceso de contaminación ambiental, así como la reducciones en consumos energéticos productos de entidades públicas.

Conclusiones

Conforme a las investigaciones realizadas para efecto del presente trabajo es visible entender que ante las nuevas demandas sociales, políticas y económicas derivadas de la tendencias actuales en materia de sustentabilidad, sostenibilidad y bienestar, así como las nuevas legislaciones y políticas públicas, la vivienda sustentable se está convirtiendo en una necesidad vital para poder cumplir con esta demandas y mejorar día a día la calidad de vida no solo del usuario inmediato sino a manera global basado en los beneficios ecológicos y climáticos que estas traen consigo, por esta razón el conocimiento y apreciación del valor económico que poseen nos brinda un elemento integral de carácter numérico de fácil apreciación, que permitirá entender los beneficios también económicos que la aplicación de estas eco tecnologías y sistemas pasivos traerán a beneficio presente y futuro convirtiéndose con el paso del tiempo en dinero cambiante no solo económicamente sino también climáticamente, con base en esto es inherente adaptar las metodologías existentes para poder contar con técnicas valuatorias apropiadas que logren identificar el valor de cada uno de estos elementos sustentables dentro de la vivienda.

El reconocimiento del valor monetario de la vivienda sustentable en México se ha convertido en la últimas décadas en un necesidad inherente para el crecimiento económico del país y el mejoramiento en la calidad de vida de la población, ya se encuentran notablemente reconocidos los beneficios que trae consigo la edificación de este tipo de bienes en los tres ejes básicos el ecológico, social y económico, por lo tanto es de especial atención el contar con metodologías valuatorias enfocada en la búsqueda del valor de este tipo de mejoras, así como la implementación de políticas públicas que permitan el crecimiento en la construcción de estas viviendas, en la aplicación en viviendas existentes de sistemas pasivos así como la creación e implementación de nuevos materiales y procesos en favor del medio ambiente, para que socialmente exista un reconocimiento de sus beneficios y un beneficio directo a la población.

Bibliografía

- Aznar-Bellver, J. E. (2012). *Valoración inmobiliaria. Métodos y aplicaciones*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Brundtland, G. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común*. Documento A/42/427 de la Asamblea General de las Naciones Unidas.
- CANADEVI. (2024). *Sustentabilidad en la construcción de viviendas en México: El futuro está aquí*. Cámara Nacional de la Industria de Desarrollo y Promoción de Vivienda, México. <https://canadevi.com.mx/2024/10/29/sustentabilidad-en-la-construccion-de-viviendas-en-mexico-el-futuro-esta-aqui/#>
- Ceballos Pérez, S. G. (2020). *Importancia de la infraestructura verde y la planeación para el desarrollo urbano sustentable* (pp. 6–27). El Colegio de Hidalgo. http://elcolegiodehidalgo.edu.mx/descargas/publicaciones/epub/infraestructura_verde_planeacion.pdf
- CEPAL. (2001). *Memorias del seminario internacional de ecoturismo: políticas locales para oportunidades globales*. Mayo, 2001. Santiago de Chile: CEPAL
- Comisión Nacional de Vivienda. (2024). *Vivienda sustentable en México*. https://www.conavi.gob.mx/images/documentos/sustentabilidad/2b_Vivienda_Sutentable_en_Mexico.pdf
- Consejo de Normas Internacionales de Valuación (CIV). (2025). *Normas Internacionales de Valuación (IVS) 2025*. Londres, Reino Unido.

- Haro-Martínez, A. A., & Taddei-Bringas, I. C. (2014). Sustentabilidad y economía: la controversia de la valoración ambiental. *Economía, sociedad y territorio*, 14(46), 743-767. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212014000300007&script=sci_arttext
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2003). *Metodología de la investigación* (5.ª ed.). McGraw-Hill.
- Isunza Vizuet, G. & Dávila González C. (2013). *Desafíos de los programas de vivienda sustentable en México*. Cuadernos de Vivienda y Urbanismo, 4(7).
- Lamudi. (2021). *Presentación de reporte inmobiliario Lamudi*. <https://www.lamudi.com.mx/journal/presentacion-reporte-inmobiliario-lamudi/>
- Naciones Unidas. (2024). *Cambio climático*. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Támez, B. (2006). Análisis de aplicación de Arquitectura Bioclimática en casas en serie en el Área Metropolitana de Monterrey. Tesis de pre-grado sin publicación. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Alternativas para el aprovechamiento de residuos orgánicos de la producción de mezcal

Jessica Martinez-Gomez, Rodolfo Amalio Vargas-Méndez *, Gloria Lilia Osorio-Gordillo, Karina Delgado-Osorio, Juan Reyes-Reyes

Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Palmira, 62490 Cuernavaca, Morelos, México

* Autor de correspondencia: rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Gestión y aprovechamiento de residuos sólidos)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 30 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.508>

Resumen: Este artículo analiza el proceso artesanal de mezcal en Oaxaca, identificando los principales flujos de residuos y evaluando alternativas de gestión y valorización bajo un enfoque de sostenibilidad ambiental. Mediante, entrevistas a productores, complementado con literatura, se diagnosticaron áreas críticas de mejora. Los resultados revelan una escasa conciencia sobre la cuantificación de residuos y el consumo de recursos, así como la falta de estrategias sistemáticas para el aprovechamiento de subproductos. Se identificaron alternativas como la producción de briquetas de bagazo, co - compostaje de vinazas y el uso de forraje animal, evaluando su viabilidad técnica y económica. El estudio concluye que la implementación de indicadores ambientales y la adopción de prácticas de valorización pueden reducir el impacto ambiental y contribuir a la sustentabilidad del sector.

Palabras clave: bagazo, pencas de agave, producción de mezcal, subproductos, vinaza

Alternative for the utilization of organic waste from mezcal production

Abstract: This article analyzes the artisanal mezcal production process in Oaxaca, identifying the main waste streams and evaluating management and valorization alternatives under an environmental sustainability approach. Through interviews with producers, complemented by a literature review, critical areas for improvement were diagnosed. The results reveal a low awareness of waste quantification and resource consumption, as well as the lack of systematic strategies for the utilization of by-products. Alternatives such as the production of bagasse briquettes, co-composting of vinasse, and the use of animal fodder were identified, and their technical and economic feasibility was evaluated. The study concludes that the implementation of environmental indicators and the adoption of valorization practices can reduce environmental impact and contribute to the sustainability of the sector.

Keywords: agave stalks, bagasse, by-products, mezcal production, vinasse

Introducción

El mezcal es una bebida alcohólica derivada de la destilación de las piñas de agave cocidas de diversas especies de agave (González *et al.*, 2018), durante los últimos años, su popularidad ha incrementado, dando como resultado una evidente demanda. La producción de mezcal a finales del año 2023 ascendió a 12 millones de litros aproximadamente, según datos reportados por el Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAM). La gestión y aprovechamiento de residuos sólidos constituyen uno de los principales desafíos para el desarrollo sustentable en la agroindustria mexicana, particularmente en el sector mezcalero, cuya expansión ha generado una presión creciente sobre los recursos naturales y el entorno (Liria *et al.*, 2022).

La producción artesanal de mezcal, predominante en Oaxaca, genera grandes volúmenes de residuos como bagazo, vinaza y pencas de agave, mismo que presentan una disposición adecuada. La literatura ha documentado los impactos negativos de estos residuos, incluyendo la contaminación de suelos y cuerpos de agua, así como la emisión de gases de efecto invernadero (Contreras-Hernández *et al.*, 2018; Mateo *et al.*, 2021). Sin embargo, recientes investigaciones han señalado el potencial de valorización de estos subproductos, destacando su uso en la producción de biocombustibles, materiales lignocelulósicos y forraje animal (Ana M. Avila-Galván *et al.*, 2024; Robles-Arias *et al.*, 2024). El presente artículo aporta un panorama general de proceso productivo artesanal de mezcal en Oaxaca, enfocado en los tres principales desechos (bagazo, vinaza y pencas de agave) de la producción artesanal de mezcal.

Materiales y Métodos

La investigación considera un análisis de información cuantitativa y cualitativa sobre la producción de mezcal artesanal en Oaxaca. Se realizó un balance de materia y energía que se establece considerando el consumo y generación asociados a cada etapa del proceso, tomando como referencia la producción de 1 litro de mezcal, usando datos reportados en diversos estudios y los obtenidos del instrumento de recolección de información. Se identificaron y describieron las características de los principales residuos: bagazo, vinaza y pencas de agave, así como su disposición tradicional. Para la evaluación de alternativas de aprovechamiento, se revisaron propuestas documentadas en la literatura, como la fabricación de briquetas de bagazo, el compostaje de vinazas y el uso de pencas como forraje.

Resultados y Discusión

Las variedades de agave que se encuentran en todo México se han utilizado desde hace varios años para la elaboración de diferentes bebidas alcohólicas. En la producción de mezcal se destaca el uso de una variedad de agave más amplia, además de ser, la principal materia prima (Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2001). El proceso general de producción de mezcal implica una secuencia de cinco etapas claves para obtener la bebida alcohólica, en secuencia como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1. Etapas del proceso.

Durante este proceso se generan diversos residuos contaminantes, incluyendo pencas y otros desechos vegetales. La producción de mezcal está regulada por la Norma NOM-070-SCFI-2016, titulada “Bebidas alcohólicas-Mezcal Especificaciones”, la cual establece los lineamientos para categorizar los diferentes tipos de producción de esta bebida. Para los fines del presente artículo se considera la producción artesanal de mezcal, que se distingue por no estar industrializado y por emplear técnicas tradicionales que emplean procesos manuales y no mecanizados. Esto sugiere que el manejo de los residuos generados durante su elaboración sigue la misma línea tradicional.

La gestión de residuos en la producción de mezcal en Oaxaca representa un desafío ambiental y económico relevante, dada la magnitud de los subproductos generados y su disposición. A continuación, se analizan los resultados obtenidos sobre la generación, disposición y alternativas de aprovechamiento de estos residuos.

Balance de materia y energía

Datos de consumo e insumos principales:

Los desechos principales de la producción se componen de Bagazo, Vinaza y las Pencas de agave, en la Tabla 1, se muestra, la cantidad aproximada que se genera por cada litro de mezcal producido, además se presentan los datos aproximados de consumo de materia prima.

Tabla 1. Cantidad de residuos e insumos por litro de mezcal producido.

Residuo	Cantidad generada	Consumo
Pencas de agave	Del 30 – 50 % del peso total de agave	-
Bagazo	Entre 7 – 15 kg / L	-
Vinaza	Entre 10 – 15 kg / L	-
Agave	-	15 a 20 kg / L
Leña	-	7 a 8 kg / L
Agua	-	20 L

De acuerdo con la Tabla 1, estos volúmenes representativos adquieren una relevancia ambiental al considerar la escala de la industria mezcalera en Oaxaca, que supera los 12 millones de litros anuales a nivel nacional.

El balance energético considera el consumo de leña como fuente principal de energía térmica y la conversión de energía química en calor para la cocción y destilación.

Consumo energético y emisiones:

El consumo energético y las emisiones asociadas se estimaron considerando un consumo de leña de entre 7 y 8 kg por litro, con un poder calorífico de 14.49 MJ/L, lo que representa una energía aportada en el rango de 101.43 a 115.92 MJ/L. Esta energía cubre una demanda térmica total estimada de 10 a 15 MJ, bajo una eficiencia de combustión aproximada de 75 % para la leña y de 92 % para las briquetas. En cuanto a las emisiones, la combustión de leña presenta un factor de emisión de 1.84 kg CO₂e/kg de leña, mientras que la combustión de briquetas registra un factor de emisión de 1.51 kg CO₂e/kg de briketa.

Tabla 2. Cálculo de emisiones de CO₂

Fuentes de emisión	Factor de emisión (kgCO ₂ e/kg)	Combustible (kg/L)	Producción Anual 2023 (L)	Emisión anual (tCO ₂ e)
Leña	1.84	7	11,078,112	142,686.08
Briquetas de bagazo	1.51	0.109	11,078,112	1,823.35

La Tabla 2, presenta el cálculo las emisiones teóricas generadas de CO₂ con base en la cifra de producción de mezcal artesanal registrada por el Consejo Mexicano Regulador de la Calidad de Mezcal (COMERCAM) en Oaxaca 2023. Se percibe una reducción de emisiones hasta en un 98 %.

Características de los residuos:

A continuación, se describen las características propias de cada uno de los tres residuos obtenidos de la producción de mezcal.

Pencas de agave: El proceso de jima, es esencial para la producción de mezcal, implica la eliminación de las pencas de agave para obtener la parte con mayor concentración de azúcares, asegurando así una mejor calidad del producto final. Estas pencas, representan entre el 30% y el 50% del peso total de la planta. La base de las hojas o pencas de agave almacenan polisacáridos de fructosa (Inulina de agave) como principal carbohidrato (Robles-Arias *et al.*, 2024), además poseen una riqueza en celulosa, hemicelulosa y lignina, se clasifican como “residuos lignocelulósicos” y son considerados valiosos para la producción de biocombustibles y otros derivados, como celulosa y materiales nano celulósicos (Ana M. Avila-Galván *et al.*, 2024; Contreras-Hernández *et al.*, 2018; Pérez-Zavala *et al.*, 2020)

A pesar de estas características atribuibles a las pencas de agave, en la cadena productiva agave- mezcal, suelen abandonar este residuo en el campo optando por un ciclo natural de descomposición para que estas se reintegren en el suelo, sin embargo, resulta ser un proceso lento con potencial peligro ambiental que podría ser reservorio de microorganismos patógenos y parásitos (Montañez-Soto *et al.*, 2011; Pérez-Zavala *et al.*, 2020).

Bagazo: El bagazo es el material residual que resulta de la extracción de los azúcares fermentables durante la producción de mezcal artesanal, compuesto por las fibras restantes de las piñas de agave, generan lixiviados, los cuales por tener un pH aproximadamente de 4.6, provocando trastornos en los suelos, impidiendo que los nutrientes se fijen en este ocasionando erosión (Mateo *et al.*, 2021).

Vinaza: Las vinazas mezcaleras son un problema ambiental que se ha acentuado significativamente en los años recientes (López-Covarrubias & Aguilar-Juarez, 2023), califican como efluentes agresivos con alta carga orgánica y sales, al descargarse en cuerpos de agua o suelos puede tener un impacto negativo en el ecosistema (González *et al.*, 2012),

debido a que es un subproducto con un pH ácido, suelen ser desechadas sin ningún tipo de tratamiento, afectando su fertilidad y contribuyendo a la degradación ambiental, dañando mantos freáticos, ríos y arroyos (Mateo *et al.*, 2021); así como, mortalidad de flora endémica y fauna silvestre, déficits de oxígeno disuelto, eutrofización en cuerpos de agua y fitotoxicidad para plantas y cultivos (J. M. V. Cortés *et al.*, 2022; González *et al.*, 2018).

Alternativas de aprovechamiento de bajo costo:

En suma, la acumulación de pencas, bagazo y la aplicación de vinazas mediante riego en el suelo provocan modificaciones en las propiedades físicas, químicas y bioquímicas de este. El cambio inicial se manifiesta con la deposición de materia orgánica en la capa superficial y el endurecimiento del suelo. Diversos estudios han reportado efectos como la compactación y la reducción de permeabilidad, por tanto, los efectos derivados de la aplicación de estos residuos al suelo varían en función de factores como la cantidad aplicada, el tipo de suelo, entre otras (Moran-Salazar *et al.*, 2016; Zelaya-Benavidez *et al.*, 2021). Por otra parte, la falta de aprovechamiento de estos residuos representa una pérdida de recursos potenciales valiosos para la económica local.

Desde una perspectiva económica, el manejo inadecuado de residuos implica costos ocultos para los productores (limpieza, remediación, posibles sanciones ambientales) y la comunidad (afectación a la salud, pérdida de productividad agrícola). Por tanto, la valorización de estos residuos como subproductos puede traducirse en ahorros e ingresos adicionales.

Para ello se proponen tres alternativas para producir un producto de valor a partir de los desechos de la producción artesanal de mezcal, considerando accesibilidad económica.

Briquetas a base de bagazo: La fabricación de briquetas a partir de bagazo surge como una alternativa con beneficios ambientales y económicos. Debido a la accesibilidad que proporciona para sustituir parcialmente la leña utilizada en la producción, reduciendo la presión sobre los recursos forestales y las emisiones de Dióxido de carbono CO₂. Una inversión en equipos para la producción de briquetas podría ser recuperable a mediano plazo, especialmente si se implementa a escala continua. Aproximadamente se utilizan 7 kg de leña para la producción de 1 litro de Mezcal, aproximadamente \$ 14.28 pesos por kg es decir una inversión de casi cien pesos por un litro, por otra parte, el bagazo es materia prima disponible con un costo adicional de \$ 1.20 por concepto de aglutinante (papel o cartón). Las briquetas elaboradas a base de bagazo presentan un alto poder calorífico y una baja emisión de contaminantes, lo que las convierte en una opción para cubrir las necesidades energéticas de la destilación del mezcal, reduciendo aproximadamente hasta un 98 % las emisiones de CO₂ (Contreras *et al.*, 2023).

Co-compostaje con residuos orgánicos: El co-compostaje de vinazas con residuos orgánicos sólidos, preferentemente agrícolas y agroindustriales, emergen como una estrategia de bajo costo para la remediación y mejora edáfica, aportando propiedades fertilizantes cruciales para suelos en zonas áridas. Resulta especialmente pertinente en contextos rurales donde la implementación de tecnologías más sofisticadas se ve limitada por su alto costo y la necesidad de personal especializado (A. R. Cortés & Hernández, 2017). El proceso técnico implica la mezcla equilibrada de las vinazas con materia orgánica en este caso bagazo que actuara como soporte fibroso, y su gestión en pilas aireadas que aseguran una ventilación y humedad óptimos para fomentar la actividad microbiana. Por tanto, el control adecuado de estos residuos puede convertirlos en un producto que aporta nutrientes de manera correcta al suelo, además dependiendo del nivel de producción pudiese representar un ingreso extra la venta y comercialización de este subproducto (Zelaya-Benavidez *et al.*, 2021).

Forraje para animales: Las pencas, tradicionalmente son abandonas en el campo de cultivo, esperando su ciclo natural de descomposición para fertilizar la tierra, sin embargo, como se menciona anteriormente resulta ser un proceso lento. Por lo que la transformación de este residuo en alimento para animales resulta es una estrategia que aporta valor económico y fomenta la economía circular (Ana M. Avila-Galván *et al.*, 2024). La elaboración de forraje a partir de pencas de agave comprende su corte en fragmentos pequeños, seguido de un proceso de fermentación anaerobia (ensilaje) durante 30 días en contenedores herméticos. Este método disminuye el pH, mejora la palatabilidad y digestibilidad del alimento, preservando la mayoría de los nutrientes esenciales para el ganado (Estrada Maya & Weber, 2022). La eficiencia en la reducción de contaminantes ambientales depende directamente del aprovechamiento y transformación del residuo, contribuyendo de esta forma a la disminución de acumulación de residuos en zonas rurales.

Discusión

Los resultados muestran que, aunque existen alternativas para el aprovechamiento de los residuos del mezcal, su adopción es aún limitada por barreras técnicas, económicas y de conocimiento entre los productores. La literatura coincide en que la integración de estrategias de valorización puede reducir significativamente el impacto ambiental y generar benéficos económicos (Ana M. Avila-Galván *et al.*, 2024; Pérez-Zavala *et al.*, 2020).

Futuras línea de investigación deben enfocarse en la optimización de procesos de valorización, el análisis de mercados para productos derivados de residuos y la evaluación integral de impacto ambiental y económico. El desarrollo de indicadores específicos permitirá monitorear el avance y orientar la toma de decisiones hacia una producción de mezcal sostenible. Cada uno de los desechos presentados cuentan con diversas alternativas algunas más exploradas que otros y variaciones en cuanto a costos de inversión, el presente artículo se enfoca en identificar las que resulten económicamente viables para pequeños productores. Y se prevén los siguientes resultados favorables en cada alternativa propuesta.

Durante la jima para la obtención de la piña de agave se desaprovechan las pencas que son las hojas que recubren a la piña, estas normalmente son abandonadas en el campo de cultivo, generando posible contaminación ambiental. La propuesta de utilizarse para abono no es del todo negativa, simplemente es que necesita las condiciones correctas y controladas para poder obtener la mejor eficiencia posible y/o en este caso, utilizarse para una nueva función, como generar alimento para animales, esta práctica no solo disminuye la cantidad de residuo generado, si no también representa un ingreso adicional para el productor y/o reducción de costos para quienes crían ganado (Ana M. Avila-Galván *et al.*, 2024). El porcentaje de reducción de este contaminante estaría en dependencia directa del porcentaje de aprovechamiento y transformación. Para potenciarlo, es clave ofrecer capacitación y acceso a tecnologías adecuadas.

Por otra parte, se generan alrededor de 15 kg de Bagazo por cada litro de mezcal producido, tomando en consideración la producción anual, se estaría presentando más de cien millones de este desecho. De 15 kg de bagazo se pueden obtener alrededor de 67 briquetas de bagazo con una composición de 60 % bagazo y 40 % aglutinante. De acuerdo con diversas investigaciones las briquetas con esta composición tienen un eficiencia de combustión promedio de 92 % mientras que la combustión de leña se sitúa en un 75 %, por lo que, en primer lugar, se aprovecharía el desecho para convertirlo en un subproducto que ayudara para eliminar o disminuir el uso de leña, en segundo lugar, se reduce la contaminación ambiental al aprovecharlo como subproducto, y por último disminuye en gran medida las emisiones generadas de CO₂ hasta en un 98 %.

Ahora bien, las propuestas se encuentran alineadas unas con otras, para lograr una cadena donde se provechen completamente los desechos, transformándolos en uno u otro subproducto, por lo que, la alternativa del compostaje de vinaza con materia organica que puede ser el mismo bagazo bajo condiciones controladas, es posible minimizar o eliminar las características contaminantes de estos y volverlos fertilizante orgánico con alta efectividad. Se obtienen aproximadamente 15 litros de vinaza por litro de mezcal producido, y como se menciona anteriormente este líquido recalcitrante genera complicaciones en el suelo si es vertido sin tratamiento previo, sin embargo, con las dosis adecuadas y la correcta aireación está en conjunto de bagazo podría convertirse en un subproducto útil para el productor, al ser un subproducto comercializable, este representaría ingresos tras su venta. De igual forma el agua residual restante puede pasar por un proceso de filtración común y reutilizarse en cuestiones básicas del proceso o bien llevando a cabo una inversión mayor se puede implementar un sistema de filtración mediante osmosis inversa, ampliamente aplicado en purificar la sal de mar, actualmente existen diversos sistemas adaptados para procesar ciertos litros, esto sería funcional para utilizar el agua limpia para alguna de las fases del proceso principalmente en la fermentación.

Por tanto, las alternativas propuestas, no solo serán beneficiosas reducir la contaminación generada por los desechos del proceso artesanal de mezcal, al tener un enfoque hacia el pequeño productor, también estarían abriendo la posibilidad de adquisición económica mediante la comercialización de los subproductos. De igual forma, se precisa necesario hacer del conocimiento de los productores todo lo que conlleva su proceso en cuestión ambiental para generar conciencia.

Conclusiones

La gestión integral y valorización de los residuos generados en la producción artesanal de mezcal presentan una oportunidad clave para reducir el impacto ambiental y fortalecer la sostenibilidad del sector. La adopción de alternativas viables como la fabricación de briquetas de bagazo, el co – compostaje de vinazas y la producción de forraje a partir de pencas de agave, mismas que ofrecen características favorables para mejorar la fertilidad del suelo, la diversificación de ingresos y reducción de costos de los productores, por lo que la adopción de estas estrategias en conjunto con la implementación de indicadores, permitirá optimizar el uso de recursos y promover una economía circular en las comunidades mezcaleras. Para ello se requiere fortalecer la capacitación técnica de los productores, acceso a tecnologías apropiadas y políticas públicas que fortalezcan la idea de una economía circular. La transición hacia un modelo sostenible de la producción artesanal de mezcal no solo minimizaría impactos ambientales, sino también podría fortalecer la resiliencia económica de las comunidades productoras.

Agradecimientos y financiamiento: A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por su contribución económica recibida y su compromiso con la investigación.

Bibliografía

- Aguilar-Juarez, O., & López-Covarrubias, M. (2023). Tratamiento de vinazas tequileras a partir de biochar derivado de bagazo de agave. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 2(1), 327–333. <https://doi.org/10.56845/terys.v2i1.374>
- Ana M. Avila-Galván, Morales-Castro, J., Ruíz-Leza, H. A., Manzanares-Meza, O. A., Morales-Contreras, B. E., Guerra-Rosas, M. I., & Rosas Flores, W. (2024). La segunda vida del agave: Nuevas aplicaciones para residuos agroindustriales de las industrias del tequila y mezcal. *Frontera Biotecnológica*, 29, 34–43. <https://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/volumen/vol29/pdf/vol-29L-4.pdf>
- Contreras, E. H., Cruz, J., & Benavides, L. M. (2023, septiembre). Valorización energética de briquetas de agave mezcalero. *CIIDIR Unidad Oaxaca*, 7(Especial), 07–16. <https://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/assets/files/ciidiroaxaca/sites/cccto/docs/publicaciones/cccto-vol7-num-especial-agave-2023.pdf>
- Contreras-Hernández, M. G., Ochoa-Martínez, L. A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Rocha-Guzmán, N. E., Lara-Ceniceros, T. E., Contreras-Esquivel, J. C., Prado Barragán, L. A., & Rutiaga-Quiñones, O. M. (2018). Effect of ultrasound pre-treatment on the physicochemical composition of *Agave durangensis* leaves and potential enzyme production. *Bioresource Technology*, 249, 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.009>
- Cortés, A. R., & Hernández, C. de la C. (2017, diciembre). El mezcal, su producción y tratamiento de residuos. *Alianza y Tendencias*, 2(8), 10–14. <https://zenodo.org/records/5083893>
- Cortés, J. M. V., Zuñiga, M. A. G., & Ordoñez, L. A. U. (2022). Proceso de biofiltración anaerobia con cama orgánica e inorgánica tratando vinazas de mezcal: Fase de formación de biopelícula. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 1(1), 23–24. <https://doi.org/10.56845/terys.v1i1.129>
- Estrada Maya, A., & Weber, B. (2022). Biogás y bioetanol a partir de bagazo de agave sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23(2), 1–10. <https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2022.23.2.009>
- González, V. R., Mayer, J. G., Seijas, N. R., & Varaldo, H. M. P. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*, 157(4), 524–546. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.09.006>
- González, V. R., Varaldo, H. M. P., Mayer, J. G., & Ordaz, N. R. (2018). Combined treatment of mezcal vinasses by ozonation and activated sludge. *Water Environment Research*, 90(11), 1985–1996. <https://doi.org/10.2175/106143017X15054988926433>
- Iñiguez-Covarrubias, G., Díaz-Teres, R., Sanjuan-Dueñas, R., Anzaldo-Hernández, J., & Rowell, R. M. (2001). Utilization of by-products from the tequila industry. Part 2: Potential value of *Agave tequilana* Weber azul leaves. *Bioresource Technology*, 77(2), 101–108. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00167-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00167-X)
- Liria, M. G., Davidson-Hunt, I. J., & Robson, J. P. (2022). Artisanal products and land-use land-cover change in Indigenous communities: The case of mezcal production in Oaxaca, Mexico. *Land*, 11(3), 387. <https://doi.org/10.3390/land11030387>
- Mateo, P. S., Sánchez, R. M. V., Velázquez, J. G., & Flores, A. R. (2021). Adobes sustentables a partir de los desechos de la producción de mezcal. *Revista Global de Negocios*, 9(1), 45–59. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3942093
- Montañez-Soto, J., Venegas-González, J., Vivar-Vera, M., & Ramos-Ramírez, E. (2011). Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del *Agave tequilana* Weber Azul. [Revista sin datos de volumen ni editorial], 23(3).
- Moran-Salazar, R. G., Sanchez-Lizarraga, A. L., Rodriguez-Campos, J., Davila-Vazquez, G., Marino-Marmolejo, E. N., Dendooven, L., & Contreras-Ramos, S. M. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: Consequences and perspectives. *SpringerPlus*, 5(1), 1007. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2410-3>
- Pérez-Zavala, M. D. L., Hernández-Arzaba, J. C., Bideshi, D. K., & Barboza-Corona, J. E. (2020). Agave: A natural renewable resource with multiple applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15), 5324–5333. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10586>
- Robles-Arias, M., Guzmán-Rodríguez, F., & Cruz-Guerrero, A. (2024). Evaluation of the suitability of *Agave salmiana* leaves for fructooligosaccharides recovery. *ACS Food Science & Technology*, 4(7), 1626–1631. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00668>
- Zelaya-Benavidez, E. A., Martínez-Gutiérrez, G. A., Escamirosa-Tinoco, C., & Morales, I. (2021). Vinazas de mezcal y su efecto biofertilizante en el rendimiento de hortalizas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(3), 12. <https://doi.org/10.19136/era.a8n3.3159>

Implementación de granjas sostenibles domésticas para la autosuficiencia alimentaria

Leila M. Coyote-Estudillo, Rodolfo A. Vargas-Méndez *, Gloria L. Osorio-Gordillo, Juan Reyes-Reyes, Karina Delgado-Osorio

Tecnológico Nacional de México/CENIDET. Interior Internado Palmira S/N Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México.

* Autor de correspondencia: rodolfo.vm@cenidet.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Agricultura Sustentable)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 30 de diciembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.510>

Resumen: Este artículo se centra en la implementación de granjas sostenibles para uso doméstico (GSD), promoviendo técnicas como la fertilización natural del suelo, el manejo responsable del agua y la incorporación de energías renovables. Las GSD juegan un papel crucial en la seguridad alimentaria, al ofrecer alimentos frescos y nutritivos, disminuyendo la dependencia de productos importados y procesados. Además, fomenta la adopción de prácticas agroecológicas, como la rotación de cultivos y la integración de especies nativas, lo que contribuye a la conservación de la biodiversidad local y la resiliencia de los sistemas productivos ante el cambio climático. Estas granjas incorporan sistemas de compostaje y reciclaje de residuos orgánicos, cerrando ciclos y reduciendo la generación de desechos; fomentan el uso eficiente del agua, mediante técnicas como la captación de lluvia, optimizan los recursos hídricos y minimizan el impacto ambiental. La diversificación de cultivos y la producción animal en sistemas controlados permiten afrontar desafíos ambientales y económicos de manera integral. Este modelo no solo mejora la nutrición familiar, sino que también fortalece la interacción comunitaria y preserva los conocimientos agrícolas tradicionales, impulsando el desarrollo de comunidades más autosuficientes y sostenibles.

Palabras clave: sostenibilidad, compostaje, agricultura sostenible, bienestar animal, huertos

Implementation of domestic sustainable farms for food self-sufficiency

Abstrac: This article focuses on the implementation of sustainable farms for domestic use (SFD), promoting techniques such as natural soil fertilization, responsible water management, and the incorporation of renewable energies. SDF play a crucial role in food security by providing fresh and nutritious food, reducing dependence on imported and processed products. In addition, they encourage the adoption of agroecological practices, such as crop rotation and the integration of native species, which contributes to the conservation of local biodiversity and the resilience of production systems to climate change. These farms incorporate composting and organic waste recycling systems, closing cycles and reducing waste generation. They promote efficient water use through techniques such as rainwater harvesting, optimizing water resources and minimizing environmental impact. Crop diversification and animal production in controlled systems allow for a comprehensive approach to environmental and economic challenges. This model not only improves family nutrition but also strengthens community interaction and preserves traditional agricultural knowledge, promoting the development of more self-sufficient and sustainable communities.

Keywords: sustainability, composting, sustainable agriculture, animal welfare, vegetable gardens

Introducción

La aplicación de prácticas sostenibles es una iniciativa para fomentar un futuro viable ante los desafíos ambientales al promover un uso racional y eficiente de los recursos naturales, como agua, aire, suelo y la biodiversidad. Estas prácticas permiten la conservación de los recursos para las futuras generaciones (Morote Seguido y Olcina, 2022; Pernía *et al.*, 2022). Adoptar prácticas sostenibles no solo protege el medio ambiente, sino que promueve a una mejor economía y a sociedades más justas. Las prácticas sostenibles pueden aplicarse en cualquier ámbito, en la vida humana, producción de alimentos, construcción y diseño de ciudades o espacios, en la industria y en las actividades diarias (Damián Tibacuy *et al.*, 2022). En la Figura 1 se observan las diferentes áreas donde se pueden aplicar prácticas sostenibles.

En un mundo donde los cambios de temperatura son cada vez más drásticos, surge la importancia del cuidado del medio ambiente, es por ello que muchas personas buscan estrategias de vivir de manera sostenible y autónoma. Un componente esencial de este término son las prácticas sostenibles en la agricultura y en el sector pecuario, donde se procura el cuidado del medio ambiente, se prioriza el bienestar animal y la eficiencia energética. Sin embargo, la falta de conocimiento sobre prácticas agrícolas sostenibles, prácticas pecuarias y el sistema de manejo integrado puede disuadir a su aplicación (Mier-Tous *et al.*, 2023).



Figura 1. Áreas donde se puede aplicar la sostenibilidad (Elaboración propia)

Para ello, una de las maneras más efectivas de lograr esto es por medio de la creación de granjas sostenibles para uso doméstico (GSD). Estas granjas domésticas permiten a las familias producir su propio alimento fresco y saludable, también fomentan un estilo de vida ecológico y económico. Al cultivar frutas y verduras, criar animales de corral y dirigir los residuos de manera consiente, las granjas sostenibles para uso doméstico ofrecen oportunidades para reducir la huella de carbono familiar. La implementación de las GSD no sólo ofrece beneficios locales, sino que también contribuyen significativamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (UNDESA, 2023), adoptados por las Naciones Unidas en el 2015 (Figura 2). Estas granjas, al promover la producción de alimentos de manera sostenible se alinean con el ODS 2 “Hambre cero”, ya que mejora la seguridad alimentaria y la nutrición a nivel familiar y comunitario. Las granjas sostenibles para uso doméstico, desempeñan un papel esencial en la mejora del medio ambiente y el entorno social; la construcción de estas granjas ayuda a erradicar la pobreza (ODS 1), incrementa el bienestar y salud de las personas al cultivar alimentos saludables y libres de pesticidas (ODS 3), promueven el uso eficiente y cuidado de los recursos hídricos (ODS 6), fomentan el crecimiento económico personal y familiar al tener la posibilidad de vender productos (ODS 8), así mismo fomentan un consumo y producción responsable (ODS 12), se tienen buenas prácticas agrícolas que fomentan el cuidado y mejoramiento de suelos (ODS 15). Estas granjas son una oportunidad para lograr mejorar el cambio climático (ODS 13) a nivel doméstico.



Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible que logran cubrirse con la implementación de granjas sostenibles para uso doméstico (Elaboración propia)

La sostenibilidad en granjas para uso doméstico considera el bienestar animal, brindando comodidad y salud para un desarrollo correcto de los animales (Sánchez-Casanova *et al.*, 2021). El presente artículo tiene como objetivo mostrar los elementos y etapas que se requiere para implementar de una granja sostenible para uso doméstico, que ayude a

las familias a tener un suministro de alimento de manera autosuficiente (Bonilla Vivas, 2021; López-Preciado *et al.*, 2021). Es importante señalar que se trata de una propuesta de implementación metodológica basada en un modelo en campo a pequeña escala. Se trata de una granja de gallinas que busca promover prácticas sostenibles, mejora el bienestar animal y la producción responsable.

Materiales y Métodos

Método de investigación aplicado

Para fortalecer la propuesta de diseño de implementación de granjas sostenibles para uso doméstico, se adoptó un enfoque metodológico mixto que integra revisión de la literatura, la implementación de una granja piloto a pequeña escala y la recolección de datos empíricos. En la revisión de la literatura, se consultaron fuentes académicas y técnicas, incluyendo artículos científicos, manuales de buenas prácticas, reportes institucionales y casos documentados de granjas sostenibles. Estas fuentes permitieron identificar elementos clave para el diseño, gestión e integración de los sistemas agrícolas y pecuarios, así como recomendaciones para el bienestar animal, manejo de recursos y sostenibilidad ambiental.

Para la implementación de una granja piloto a pequeña escala, sirvió la aplicación de recomendaciones extraídas de la literatura y se adaptaron a las condiciones reales del entorno. Se recolectaron datos empíricos directamente de la granja piloto (Figura 3) permitiendo evaluar la viabilidad, retos y beneficios de las prácticas implementadas. Así mismo, la validación en campo se complementó con métodos de recolección de información con entrevistas a los responsables de la granja piloto y encuestas sobre la percepción de beneficios y dificultades en la granja.



Figura 3. Granja sostenible para uso doméstico piloto (Elaboración propia)

Gracias a la combinación de la revisión de la literatura y la experiencia práctica en la granja piloto fue posible identificar y enlistar las etapas necesarias para la implementación de granjas sostenibles para uso doméstico. Estas etapas contemplan 1. Planificación y diseño, 2. Prácticas agrícolas sostenibles, 3. Gestión de recursos, 4. Integración de sistemas, 5. Monitoreo y evaluación, 6. Acceso a mercados y educación.

En este sentido el diseño de las granjas sostenibles debe construirse de acuerdo al tipo de animal que se quiere criar, se debe considerar el bienestar de los seres vivos que lo habitarán. Las dimensiones del corral son importantes, ya que no solo impactan en la salud y la comodidad de los animales, sino también en la producción general de la granja. Se debe planificar una distribución del espacio que pueda maximizar la productividad, la distribución debe incluir áreas dedicadas a la cría, el almacenamiento de los insumos y el manejo adecuado de residuos, aspectos importantes que ayuden a garantizar la sostenibilidad del sistema (Andrade, 2017). Un diseño apropiado ayuda a la seguridad alimentaria, ya que optimiza recursos y minimiza pérdidas, asegura una cosecha de alimentos de calidad para el consumo doméstico. Para facilitar este proceso, en la Tabla 1 se describen aspectos y recomendaciones que se deben considerar al construir una granja, desde la elección de materiales hasta la organización de los espacios (Arias Padilla, 2023).

Tabla 1. Aspectos y consideraciones para una granja sostenible para uso doméstico (Elaboración propia)

Aspecto	Consideraciones
Altura	Asegurar que las estructuras permitan la ventilación adecuada y el acceso a la luz solar.
Dimensiones	Planificar el espacio según el número de animales y cultivos, evitando la sobrepoblación.
Ubicación	Elegir un terreno con buen drenaje, acceso a agua y protegido de vientos fuertes.
Materiales	Usar materiales locales y sostenibles, como madera certificada o adobe.
Energía Renovable	Instalar paneles solares o turbinas eólicas para reducir la dependencia de la red eléctrica.
Gestión del Agua	Implementar sistemas de riego eficientes y recolectar agua pluvial.
Biodiversidad	Incorporar policultivos y rotación de cultivos para mejorar la salud del suelo.
Gestión de Residuos	Utilizar compostaje para transformar residuos orgánicos en fertilizante.
Animales	Integrar animales de manera que sus residuos contribuyan a un ciclo de nutrientes.
Control de Plagas	Emplear métodos naturales como el cultivo de plantas que sirvan como repelente de plagas o la introducción de depredadores naturales.

Con base en las consideraciones de la Tabla 1 se crea un sistema que no solo satisface las necesidades alimentarias, sino que también ayuda a una relación armoniosa entre el ser humano, los animales y el medio ambiente.

En la Figura 4 se presentan las acciones que deben adoptar las granjas para ser consideradas sostenibles donde se mencionan aspectos ambientales, sociales y económicos.

Estas acciones ayudarán a que la granja logre ser diversificada, integrada, autosuficiente y respetuosa con el medio ambiente, promoviendo el bienestar animal, la eficiencia en el uso de los recursos existentes, al desarrollo económico y a la sociedad. La implementación de granjas con este enfoque permite satisfacer necesidades actuales de producción de alimentos, sin comprometer las necesidades de las futuras generaciones.

Resultados y Discusión

Implementación de granjas sostenibles

Para construir la granja sostenible doméstica, se debe hacer una selección de animales, planificar el diseño de las instalaciones a las especies que se van a criar, tener en cuenta la integración de sistemas agrícolas y hacer un manejo adecuado de recursos y de residuos; todo esto para la puesta en marcha de la granja y que pueda garantizar la seguridad alimentaria(Bonisoli y Bagui, 2022). A continuación, se enlistan las etapas para la implementación de granjas sostenibles domésticas, considerando 1. Planificación y diseño, 2. Prácticas agrícolas sostenibles, 3. Gestión de recursos, 4. Integración de sistemas, 5. Monitoreo y evaluación, 6. Acceso a mercados y educación.



Figura 4. Acciones para lograr ser una granja sostenible (Elaboración propia)

1. Planificación y diseño

Para la planificación y diseño de las GSD se debe realizar un análisis del terreno, considerando el tipo de suelo donde se piensa instalar, se debe revisar si cuenta con disponibilidad de agua y el clima que prevalezca en el sitio (Rodríguez-Monterrosa *et al.*, 2024). Esto ayudará a seleccionar los animales que puedan crecer dentro del espacio disponible y los tipos de cultivos adecuados (Malavé Reyes, 2021). El sembrar una variedad de cultivos mejora la salud del suelo y asegura una dieta variada para los animales y productores (Velázquez-Chávez *et al.*, 2022). En la Figura 5 se muestra que una buena planificación y diseño, ayuda a tener un buen desarrollo de la granja sostenible para uso doméstico.



Figura 5. Actividades para la planificación y diseño (Elaboración propia)

Posteriormente al análisis del terreno, el diseño integrado y la diversificación de cultivos, se debe establecer los animales que pueden estar en la granja doméstica, siendo aquellos que el ser humano ha logrado domesticar, ya sea para su cría, para obtener alimentos, materiales o que ayuden en diferentes tareas. Estos animales domésticos son útiles, dóciles y se caracterizan por su capacidad de adaptarse a diferentes entornos y climas. Los animales de granja para uso doméstico han sido vitales para el crecimiento de familias y el desarrollo de la agricultura y la vida rural. En la Tabla 2 se muestra un listado de los principales animales de granja para uso doméstico con una breve descripción de su utilidad y los productos obtenidos.

Tabla 2. Animales de granja doméstica (Elaboración propia)

Animal	Utilidad/ productos
Vacas	Producción de leche y carne, trabajo
Toros/Bueyes	Trabajo agrícola (arado, transporte)
Gallinas/Pollo	Producción de huevos y carne
Patos/Gansos/pavos	Producción de carne, huevos y plumas
Cerdos	Producción de carne, grasa y cuero
Ovejas	Producción de lana, leche y carne
Cabras	Producción de leche, carne y piel
Caballos	Transporte y trabajo agrícola
Burros/Mulas	Transporte y trabajo agrícola
Conejos	Producción de carne y piel
Peces (trucha, salmón)	Producción de carne (acuicultura)

Los animales que se muestran en la Tabla 2 ayudan a la alimentación, la economía, el trabajo agrícola, y el bienestar social. Estos animales además de ser adaptables a diferentes entornos, proporcionan materias primas, productos fundamentales para la dieta humana y la seguridad alimentaria.

2. Prácticas agrícolas sostenibles

En esta etapa las prácticas agrícolas deben enfocarse en la autosuficiencia, la conservación de recursos y la armonía con los ecosistemas, se debe apoyar con la implementación de huertos o un espacio designado para los cultivos. Para esto se requiere que los cultivos que se siembren sean los adecuados dependiendo de la temporada, clima y que su aporte nutricional sea el más conveniente para los animales que se estén criando en la granja (Echeverri Flórez y Morelo Del Toro, 2023; Rojas, 2022; Vega, 2022). Se debe poner en práctica la rotación de cultivos para ayudar a evitar el agotamiento del suelo y reducir las plagas. Se recomienda conservar la estructura ya que el suelo cuenta con propios nutrientes, posteriormente se puede construir un huerto, guardar residuos orgánicos e introducirlos a un contenedor de composta para obtener tierra llena de minerales y nutrientes extra para evitar la compra de insumos externos (Ver Figura 6).

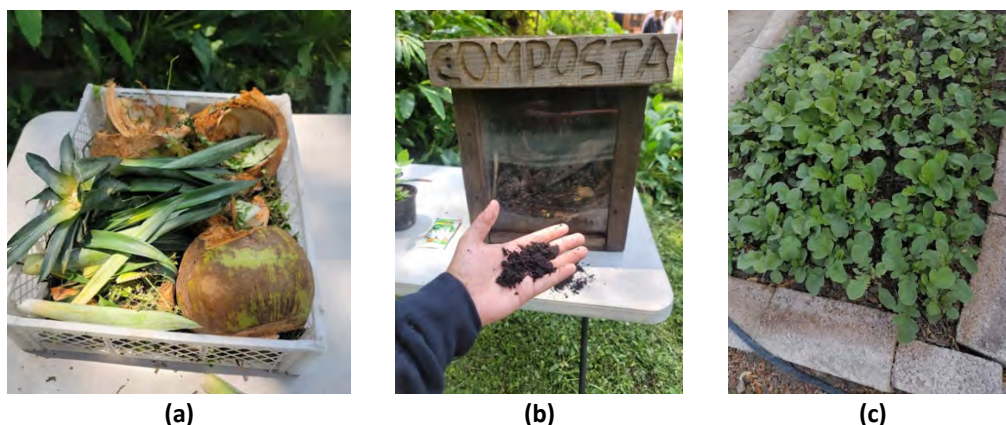


Figura 6. (a) Residuos orgánicos, (b) Composta de los residuos orgánicos, (c) Huerto (Elaboración propia)

La composta elaborada a partir de residuos orgánicos aporta nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, mejorando la estructura del suelo, su capacidad de retención de agua y su biodiversidad microbiana (Hurtado y Batioja, 2022). Para esto existen diferentes prácticas agrícolas que se deben desarrollar en la granja para el cuidado del suelo.

- Rotación de cultivos: Alternar cultivos para evitar el agotamiento del suelo y reducir la incidencia de plagas.
- Labranza mínima: Reducir la alteración del suelo para conservar su estructura y nutrientes.
- Compostaje: Utilizar residuos orgánicos para producir abono, mejorando la fertilidad del suelo y reduciendo la necesidad de insumos externos.
- Manejo integrado de plagas: Emplear métodos naturales y biológicos para controlar plagas, minimizando el uso de químicos.

3. Gestión de recursos

La gestión de los recursos es importante para poder alcanzar la autosuficiencia, la reducción de costos y minimizar el impacto ambiental en una granja doméstica sostenible. Para lograrlo, es importante cuidar el uso del agua mediante sistemas de riego sostenibles, como el riego por goteo o la recolección de agua pluvial (Rivera Martínez, 2021; Téllez Quintanar *et al.*, 2022). Esta última no solo asegura un suministro constante de agua durante épocas de sequía, sino que también permite guardar el recurso hídrico para otras actividades. Además, técnicas como el riego por la noche ayudará a evitar la rápida evaporación del agua, maximizando su aprovechamiento. Otro sistema es la microaspersión, que utiliza aspersores que simulan una lluvia fina, cubriendo áreas de diversos tamaños y minimizando el escurrimiento. Es importante nutrir el suelo con el uso de composta y abonos orgánicos, que no solo mejoren la fertilidad, sino que también promuevan la salud del ecosistema (Arzapalo y Sanchez, 2023; Flores-Mancheno y Palacios-López, 2025). Asimismo, se recomienda integrar materiales reciclados, se promueva el uso de energías renovables cuando sea viable su instalación e impulsar la participación familiar o comunitaria. Estas acciones no solo aseguran la sostenibilidad a largo plazo, sino que también fortalecen los lazos sociales y el compromiso colectivo. Una granja doméstica no solo proporciona alimentos frescos y saludables, sino que también impulsa un estilo de vida resiliente y en armonía con el medio ambiente, contribuyendo así a un futuro más sostenible para todos.

4. Integración de sistemas

La integración de sistemas en una granja doméstica sostenible es clave para alcanzar la autosuficiencia alimentaria y promover la seguridad alimentaria en el hogar. Los sistemas combinan cultivos, ganado, energías renovables y la gestión circular de residuos en un ciclo cerrado que optimiza los recursos, minimiza el desperdicio y reduce la dependencia de insumos externos. Al unir cultivos y animales, se aprovechan los residuos orgánicos como fertilizantes naturales o alimento para el ganado (Rodrigo-Comino, 2022). Además, es importante implementar prácticas agroecológicas, como policultivos, rotación de cultivos y control biológico de plagas, que no solo mejoran la biodiversidad y la salud del suelo, sino que también fortalecen la resiliencia del sistema ante cambios climáticos. El diseño del espacio debe incluir estrategias como la agroforestería y los huertos urbanos, maximizando así el uso de áreas disponibles, incluso en entornos urbanos. En la reutilización de residuos, se debe realizar prácticas como el filtrado de aguas grises y utilizarla para el riego de los cultivos, cerrando así el ciclo de producción, asegurando un uso sostenible del agua y reduciendo el impacto ambiental (Muñoz-Espinoza *et al.*, 2016).

5. Monitoreo y evaluación

El monitoreo y evaluación de la producción en una granja domestica sostenible es importante para asegurar el abastecimiento de alimentos, cultivos variados y nutritivos, promoviendo la seguridad alimentaria familiar. Para lograrlo, se debe llevar un registro de las actividades agrícolas que se realicen, debe incluir detalles de fecha de siembra, los rendimientos por metro cuadrado (kg/m^2) y las fechas de cosecha. Este diario de producción permitirá identificar áreas de mejora y adaptar los recursos disponibles. Es esencial evaluar y aplicar métodos de almacenamiento y conservación, como la deshidratación, el enlatado o la fermentación para minimizar las pérdidas de las cosechas y extender la disponibilidad de los alimentos durante todo el año. El registro climático también es importante, se sugiere monitorear variables como temperaturas, precipitaciones y eventos extremos con el uso de herramientas digitales que permitan adaptar las prácticas agrícolas a las condiciones climáticas cambiantes. En la parte económica es esencial realizar un análisis que compare los costos de insumos con el ahorro generado al reducir la compra de alimentos externos. Para facilitar el registro y análisis de datos se pueden emplear herramientas como cuadernos de campo, aplicaciones gratuitas o encuestas digitales que mejoren la gestión de la información.

6. Acceso a mercados y educación

Para tener acceso a mercados se puede explorar alternativas como el trueque o la venta de excedentes para generar ingresos adicionales que refuercen la sostenibilidad económica de la granja y la economía de los productores. Una de las estrategias para tener ingresos extra es transformar los excedentes en alimentos o productos que le agreguen valor. Estos productos pueden venderse en mercados locales, ferias agrícolas o en un negocio propio. Si la granja para uso doméstico presenta una producción mayor sería adecuado establecer relaciones con comercios cercanos, creando un intercambio de ventas. Una alternativa es promover la venta de productos excedentes en plataformas digitales para promocionarlos con fotos y videos del proceso sostenible de cultivo y cría de los animales. En la parte de educación se proponen estrategias de difusión educativa sobre la implementación de granjas sostenibles domésticas para la seguridad alimentaria. Algunas de las estrategias en la educación, sería informar sobre los principios de la sostenibilidad agrícola, las buenas prácticas pecuarias, la planificación y el marketing para pequeños productores (D. V. Ardila Bernal, 2018). Otra actividad es brindar talleres locales enfocados en prácticas agroecológicas, bienestar animal, manejo de residuos o transformación de productos.

Tabla 3. Estrategias sostenibles para capacitar a nuevos granjeros
(Elaboración propia)

Estrategia de Capacitación	Descripción
Uso de parcelas demostrativas	Parcelas para enseñar técnicas prácticas, como fertilizantes orgánicos y pesticidas naturales.
Educación práctica y adaptada	Cursos interactivos y autodirigidos sobre agricultura sostenible, combinando módulos en línea y presenciales.
Promoción del aprendizaje entre pares	Mentores experimentados capacitan a otros agricultores en talleres locales.

Estas estrategias brindan conocimiento y habilidades técnicas a los productores. La educación en estos temas no solo beneficia a los agricultores, sino que también fomenta a las nuevas generaciones a comprometerse con la sostenibilidad. En la Tabla 3 se muestran estrategias de capacitación para nuevos granjeros, estas tienen un enfoque práctico, adaptativo e inclusivo.

Discusión

La agricultura convencional se caracteriza por el uso de pesticidas, fertilizantes químicos y el uso de maquinaria pesada, lo que provoca la contaminación del suelo, del agua y pérdidas significativas de la biodiversidad y especies nativas. Por esa razón la agricultura sostenible ha ido en aumento por tener prácticas que cuidan el medio ambiente y fomentan el uso de actividades respetuosas con los recursos naturales. Para ello una alternativa es la construcción de granjas sostenibles a nivel doméstico, en donde familias ponen en práctica actividades y estrategias del cuidado de cultivos, uso de abonos orgánicos, el control biológico de plagas y el reciclaje de residuos orgánicos. Este conjunto de acciones ayuda a preservar la fertilidad y estructura del suelo, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizan la contaminación ambiental. Las granjas sostenibles domésticas tienen un impacto ambiental significativamente menor en comparación con las granjas tradicionales. Las granjas sostenibles fomentan la biodiversidad, el bienestar animal, utilizan recursos locales y alternativas para mantener el equilibrio de los ecosistemas. Es importante destacar que la validez y efectividad de las granjas sostenibles para uso doméstico se corroboró mediante la implementación y seguimiento de una granja piloto a pequeña escala. La experiencia práctica permitió confirmar que las GSD tienen un impacto ambiental significativamente menor en comparación con las granjas tradicionales, siendo un modelo viable y respetuoso con el entorno.

Conclusiones

Las GSD para la autosuficiencia alimentaria son una alternativa para la cría de animales y cultivo de alimentos. Es un enfoque que permite mejorar el medio ambiente, cuidar y preservar los recursos naturales sin comprometer la de las futuras generaciones. Estas granjas nos enseñan una gran variedad de técnicas y estrategias que cuidan el medio ambiente, impactan en la parte económica y social. La implementación e inversión dependerá de los animales que se pretenden criar y del espacio disponible que se tenga para el cultivo de plantas y árboles que permitan cerrar el ciclo de alimentación. Asimismo, estas granjas son un reto por la dificultad de puesta en marcha y la resistencia al cambio, en donde las granjas comerciales y a gran escala producen en masa siendo que no brindan un cuidado de los recursos naturales ni las buenas prácticas hacia los animales que se encuentran en ella. Las actuales prácticas de producción en masa no procuran el cuidado de los animales, al no brindarles el espacio adecuado que permita el desarrollo de los animales de manera natural. Se debe considerar la superficie de suelo necesaria por cada animal que se tendrá en la granja, la altura mínima para los corrales y área suficiente para el resguardo de los mismos. Es por ello que estas granjas representan una solución integral ya que da solución a los desafíos alimentarios y ambientales actuales. Para un futuro se espera que gran parte de la población ponga en marcha estas granjas en sus hogares, adaptándolas a sus necesidades y espacio disponible. El interés de ponerla en práctica es por consumir alimentos ecológicos libres de pesticidas y sin residuos que puedan alterar negativamente la salud. En este sentido, mediante la integración tecnologías, el diseño de las granjas con materiales eficientes y amigables con el medio ambiente, garantizar el bienestar animal y prácticas agrícolas sostenibles se espera mejorar la productividad y reducir el desperdicio alimentario, brindando la autosuficiencia alimentaria.

Agradecimientos y financiamiento: A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por su contribución económica recibida y su compromiso con la investigación.

Bibliografía

- Andrade, R. I. M. (2017). Granjas agrosostenibles–sustentables. *Revista Uniandes Episteme*, 4(2), 248–262. <https://revista.uniandes.edu.ec/ojs/index.php/EPISTEME/article/view/595>
- Arias Padilla, C. M. (2023). *La granja integral con fines didácticos innovadores para estudiantes técnicos de la Unidad Educativa Alfonso Herrera, cantón Espejo, provincia del Carchi* [Trabajo de titulación]. Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13555>
- Arzapalo, L. E. S., & Sánchez, A. D. P. M. A. (2023). Optimización del consumo de agua agrícola en Lima: Buenas prácticas y métodos de riego eficientes. *Revista Alfa*, 7(20), 464–473. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i20.229>

- Bernal, D. V. A., Rodríguez, M. D. P. R., & Nieva, F. J. A. (2018). Seguridad alimentaria y manejo sostenible agrícola con familias de pequeños productores. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 9(1), 89–105. <https://doi.org/10.22579/22484817.712>
- Bonilla Vivas, E. M. (2021). *Modelo de granja integral para la implementación de procesos agrícolas autosostenibles: Caso de estudio Villeta, Cundinamarca* [Tesis de maestría]. <http://hdl.handle.net/10882/10323>
- Bonisolí, L., & Bagui, P. E. M. (2022). Teoría de valores de consumo: granjas sostenibles en Ecuador. *Revista Eruditus*, 3(2), 65–83. <https://doi.org/10.35290/re.v3n2.2022.557>
- Damián Tibacuy, C. A., Hernández Cáceres, A., Garzón Baquero, J. E., & Bellon Monsalve, D. (2022). Desde la sostenibilidad hasta el desarrollo sustentable: una radiografía de la evolución del concepto. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*. <https://doi.org/10.56712/latam.v3i2.200>
- Echeverri Flórez, H., & Morelo Del Toro, J. D. (2023). Cultivando un futuro sostenible: sistema de implementación eco-circular Universidad de Córdoba. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/paper.3177>
- Flores-Mancheno, C. I., & Palacios-López, L. A. (2025). Tecnologías de riego inteligente y su contribución a la conservación del agua en agricultura. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 3(1), 61–73. <https://doi.org/10.70881/mcj/v3/n1/46>
- Hurtado, D. M., & Batioja, S. P. (2022). Manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos para el fortalecimiento de la cultura ambiental. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(2), 1071–1082. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i2.1940
- López-Preciado, M. L., Caicedo-Flórez, C. D., & Ossa-Jiménez, C. A. (2021). Diseño de un sistema-producto como alternativa para el cuidado del suelo y disminución de altas temperaturas mediante granjas urbanas y rurales. En *Memorias del 3º Encuentro de Investigación Formativa en Diseño (RAD)*. <https://doi.org/10.53972/RAD.eifd.2020.3.18>
- Malavé Reyes, O. I. (2021). *Diseño de una granja integral sustentable para el Centro Experimental Manglaralto* [Trabajo de titulación]. Universidad Estatal Península de Santa Elena. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/6312>
- Mier-Tous, J.-M., Pineda-Vides, F., Hernández-Ureche, J., Troncoso-Palacio, A., Andrade-Pérez, J., & Padilla-Barrios, J.-I. (2023). Una revisión preliminar de la literatura sobre los retos en la agricultura sostenible de América Latina. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 5(1), 95–105. <https://doi.org/10.17981/bilo.5.1.2023.09>
- Morote Seguido, Á. F., & Olcina, J. (2022). Cambio climático y educación: una revisión de la documentación oficial. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.749>
- Muñoz-Espinoza, M. A., Espinoza-Vaca, S., Curay-Quispe, S., Pérez-Salinas, O. M. N.-T., Mera-Andrade, R., Zurita-Vásquez, H., Velástegui-Espín, G., Pomboza-Tamaquiza, P., Carrasco-Silva, A., & Barros-Rodríguez, M. (2016). Granjas sostenibles: Integración de sistemas agropecuarios. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 19(2), 93–99. <https://doi.org/10.56369/tsaes.2221>
- Pernía, J. P. S., Trasfi Mosqueda, M., & Sanabria Chópita, M. (2022). Objetivos de desarrollo sostenible y responsabilidad social universitaria. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 28(1), 367–385. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28069961026>
- Rivera Martínez, E. F. (2021). *Monitoreo técnico para el mejoramiento del recurso hídrico en granja avícola del Valle de Tenza* [Trabajo de titulación]. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/4208>
- Rodrigo-Comino, J., Caballero-Calvo, A., Salvati, L., & Senciales-González, J. M. (2022). Sostenibilidad de los cultivos subtropicales. *Cuadernos Geográficos*. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v6i1.22284>
- Rodríguez-Monterrosa, I., Reséndiz-Résendiz, C. A., Salgado-López, F. J., & Hernández-Chávez, D. (2024). La importancia del agua en la agricultura. *XAHNI Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 6*, 2(3), 36–40. <https://doi.org/10.29057/xahni.v2i3.13001>
- Rojas, D. L. R. (2022). Agroecología urbana: huertos, granjas y viveros comunitarios. *Alter-nativa*, (12), 99–119. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/alter-nativa/article/view/40976>
- Sánchez-Casanova, R. E., Muñoz-Orsorio, G. A., & Sarmiento-Franco, L. (2021). Bienestar animal y manejo de grupos en granjas. *Información Técnica Económica Agraria*, 117(4). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8062271>
- Téllez Quintanar, C., Mocva Kurek, R. K., González Correa, C., & Centeno Álvarez, J. C. (2022). *¿Cómo hacer un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) en mi escuela?* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- UNDESA. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Vega, M. E. M. (2022). Huerta escolar como estrategia didáctica facilitadora de aprendizajes ambientales. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 1779–1792. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2696
- Velázquez-Chávez, L. D. J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>

Humedales contruidos como jardineras florales para limpiar el agua residual a nivel domiciliario. Una solución biomimética para apoyar al ambiente

José Luis Marín-Muñiz ^{1,*}, Sergio Aurelio Zamora Castro ², Juan Antonio Triana-Tello ³, José C. Zamora-Castro ⁴, Neira Sánchez Zarate ¹, Joaquín Sangabriel Lomelí ⁵

¹ Departamento de Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Km. 1.8 Carretera a la Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

² Facultad de Ingeniería, construcción y hábitat, Universidad Veracruzana, Bv. Adolfo Ruiz Cortines 455, Costa Verde, Boca del Río 94294, Veracruz, México

³ Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales. Universidad Veracruzana. Veracruz, México

⁴ Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Ciudad Universitaria, en la intersección de la Av. de las Américas y el Blvd. Universitarios, sin número, en Culiacán, Sinaloa, México. 80040

⁵ Departamento de Ingeniería Civil. Instituto Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Km. 1.8 Carretera a la Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: jmarinm@itsm.edu.mx; Tel.: +52 2281624680

Artículo de divulgación científica

Recibido: 22 de abril de 2025

Aceptado: 5 de junio de 2025

Publicado: 3 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.656>

Resumen: El tratamiento del agua es una necesidad mundial, pero desde cada hogar se pueden implementar acciones que apoyen a mitigar la problemática por descarga de aguas residuales. Los humedales contruidos son un ejemplo de esas estrategias, son una solución basada en la naturaleza que mediante procesos físicos, químicos y biológicos degradan contaminantes. Su aplicabilidad en traspatio para limpiar las aguas grises del hogar es una opción que aquí se plantea, donde se sugiere el uso de plantas ornamentales para convertir el sistema en jardineras florales de tratamiento. Se describen aplicaciones, condiciones y características a considerar, así como la descripción de plantas ornamentales a implementar. Entre las plantas ornamentales más comunes en zonas tropicales se encuentran *Zantedeschia aethiopica*, *Heliconia latispatha*, y el uso de la especie común de humedales *Typha angustifolia*. La replicabilidad de estas alternativas apoya en avanzar hacia el alcance de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS), principalmente los ODS 6, 11 y 15.

Palabras clave: tratamiento de agua, ecotecnologías, sustentabilidad, economía circular, soluciones basadas en la naturaleza

Introducción

Los problemas sociales y ambientales son una preocupación común entre la sociedad y el campo científico. Ante ello, diversas investigaciones han dado pie a buscar soluciones a las problemáticas de cambio climático y contaminación, tanto en aire, suelo y agua. Al respecto del recurso hídrico, aunque se reconocen alternativas convencionales para su tratamiento (sistemas de lodos activados, reactores anaerobios, etc), estas suelen ser muy costosas de implementar y de sostener, dado los requerimientos de personal especializado y de gastos operativos, entre ellos de energía eléctrica, requeridos para el funcionamiento de estos (Gorgoglione y Toretta, 2018).

Dicha situación ha desfavorecido la réplica masiva de dichos sistemas de tratamiento y hasta el abandono de sistemas ya instalados., dejando a la vez avanzar la problemática de contaminación por aguas residuales a otros cuerpos de agua como lagos, ríos, océanos o incluso descargados a cielo abierto, infiltrándose hacia el subsuelo. Todo ello provocando vulnerabilidad a la salud tanto de los diferentes ecosistemas, como de la sociedad.

En la búsqueda de opciones para atender la problemática del agua contaminada, una alternativa ecológica y económicamente viable son los humedales contruidos, también llamados humedales de tratamiento, los cuales son sistemas originados a partir de la ingeniería ecológica, ciencia en la que se diseñan ecosistemas sustentables, consistentes con los principios ecológicos, integrando a la sociedad con su ambiente para beneficio de ambos (Mitsch *et al.*, 2023). Dichos sistemas son diseñados con el fin de imitar la función de mejorar la calidad del agua que ocurren en los humedales naturales. Los humedales contruidos, consisten en celdas impermeables con un sustrato, y vegetación, donde se hace pasar el agua contaminada (Marín-Muñiz 2017).

Entre el sustrato y las raíces de las plantas se desarrollan familias o grupos de microorganismos que apoyan en la degradación de contaminantes presentes en el agua. Así mismo, la presencia de las plantas hidrófitas (plantas que

resisten altas condiciones de humedad) absorben (las moléculas se infiltran en el interior de un material) o adsorben (las moléculas se adhieren a la superficie de un material) también otros elementos contaminantes del agua. En el caso del sustrato, que puede ser suelo u otro material filtrante granular o poroso (grava, tezontle, zeolita, tepezil, plásticos rugosos, etc), este también juega un papel importante como filtro o colador de los contaminantes, así como medio de anclaje de las raíces de las plantas (Zamora *et al.*, 2025). Con todo esto entonces quedan claros los componentes de un humedal construido, los cuales incluyen a la vegetación, el sustrato y los microorganismos, en conjunto con el agua, que es el medio que tratar.

El tratamiento en los humedales ocurre a través de procesos físicos, químicos y biológicos, y su diseño ingenieril es el resultado de imitar la función destoxificadora que realizan los humedales naturales. De allí que considerando que la biomimética es una disciplina que estudia los modelos, sistemas, procesos y elementos naturales para imitarlos y así encontrar soluciones innovadoras y sostenibles a problemas humanos en diversos campos (Rocha Rangel *et al.*, 2012), como la ingeniería, como en este caso, haciendo uso de la ingeniería ecológica, es que los humedales construidos son entonces una solución biomimética para paliar la contaminación del recurso hídrico.

Existen diferentes tipos de humedales construidos, y aunque su uso ha sido principalmente para el tratamiento de aguas residuales tanto comunitarias, municipales e industriales, estos deberían ser instalados en cada hogar, para limpiar las aguas residuales particulares, lo cual apoyaría a la reutilización del líquido en otras actividades del hogar y a evitar menos descargas de aguas residuales a otros cuerpos de agua, cuando no existen sistemas de tratamiento de mayor escala. En este estudio se abordan los tipos de humedales construidos que pueden aplicarse en el hogar como jardineras florales y se describen las principales plantas ornamentales utilizadas para dicho propósito, así como algunas consideraciones importantes.

Desarrollo

¿Qué tipo de humedales construidos existen?

De acuerdo con el tipo de flujo, los sistemas de humedales construidos pueden ser de flujo superficial; canales donde el agua está en contacto directo con la atmósfera, por lo que puede haber especies de plantas flotantes, sumergidas (dentro de la columna de agua, pero arraigadas en el suelo o sustrato) y plantas emergentes (arraigadas en el suelo/sustrato, pero salen de la columna de agua).

El otro tipo de humedales son los sistemas subsuperficiales (celdas donde el agua fluye entre el sustrato), en los que solo puede haber plantas emergentes, dado que la celda está llena del sustrato. Los humedales construidos de flujo subsuperficial pueden tener una dirección de entrada de flujo de agua que pueda ser de manera horizontal o vertical. En el caso de los de flujo horizontal, estos son diseñados para que el agua entre y salga por gravedad en dicha dirección, no se requieren gastos de energía eléctrica.

Para el caso de los humedales construidos de flujo subsuperficial verticales, estos liberan el agua de arriba hacia abajo, mediante una tubería perforada, pero las dosis de rociado si deben ser manipuladas de manera controlada, por lo que, para dicho rociado, comúnmente requieren operación con energía eléctrica (Vymazal, 2022). Por lo cual, son más los sistemas subsuperficiales de flujo horizontal los instalados en México, en comparación con los de flujo vertical (Marín-Muñiz *et al.*, 2023).

Muchas veces para mejorar las condiciones de remoción de contaminantes es necesario combinar los tipos de humedales y direcciones de flujo, es decir, después de pasar por un tipo de humedal, el agua se hace pasar por otro tipo de humedales, cuando esto sucede, entonces se les llaman humedales híbridos (Figura 1).

Entonces, conociendo este tipo de alternativas para mejorar la calidad del agua, su implementación en los hogares sería de gran utilidad para limpiar al menos las aguas grises (aquellas aguas residuales que resultan de la lavadora, lavaderos, regadera, lavabos y de trapeado en el hogar), donde la instalación se integre a las áreas de traspatio como una jardinera con plantas que armonicen lo visual o estético y lo ecológico.

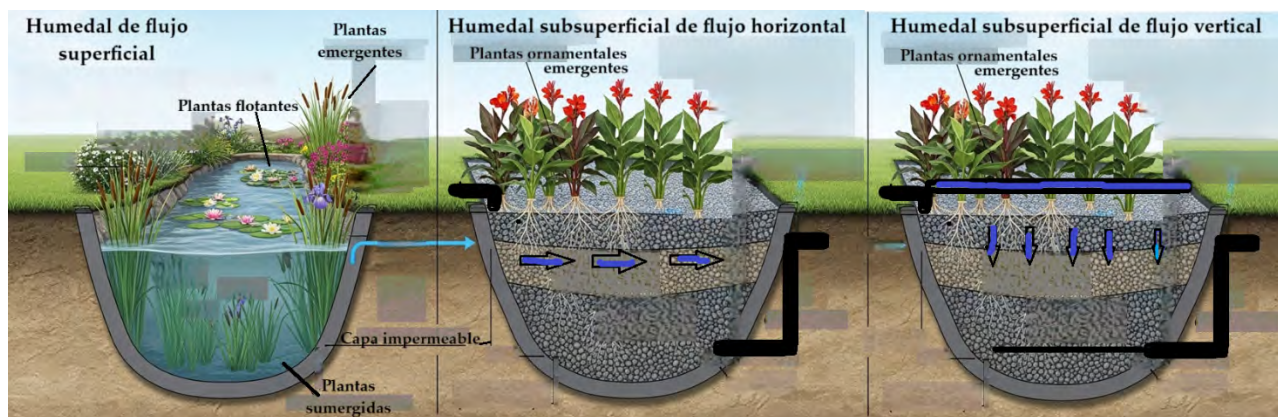


Figura 1. Esquema de los diferentes tipos de humedales de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo con el tipo de flujo. (Elaboración propia)

¿Por qué es importante limpiar el agua desde los hogares?

Cuando hablamos de contaminación de agua, comúnmente se hace referencia al resultado del vertimiento de aguas negras a otros cuerpos de agua como ríos, lagunas, lagos u océanos, esto derivado de la falta de sistemas de tratamientos de dichas aguas, trayendo como consecuencia la afectación de la flora y fauna de los cuerpos receptores, así como también vulnerabilidad a la salud de los humanos que hacen uso de esas aguas no tratadas.

Entonces, antes de pensar en construir sistemas de tratamiento de aguas residuales a gran escala para toda una comunidad o municipio, considerando que pocas veces se invierte en ello por la falta de recursos económicos, es pertinente considerar la instalación de sistemas domiciliarios o casa o por casa, al menos para el tratamiento de las aguas grises. Estas aguas en conjunto integran una mezcla de contaminantes químicos de la cosmética, farmacéutica, lavandería y contaminantes biológicos de los residuos de comida en la cocina y hasta algunos virus o bacterias, así como material particulado. Todos estos contaminantes podrían degradarse, si antes de ser descargadas al drenaje o cielo abierto, pasan por un sistema de tratamiento, como los humedales construidos.

Cabe recalcar que la ecotecnología de humedales son alternativas que deben utilizarse como sistemas secundarios o terciarios. Algunos sistemas previos a un humedal incluyen desarenadores, sedimentadores, separadores de grasas o cribas. Para el caso de los hogares, si el agua es inicialmente almacenada en algún tanque contenedor, este podría funcionar como un sedimentador, cuya salida de agua hacia los humedales debe estar al menos 20 cm más arriba de la base del contenedor, y debe lavarse al menos anualmente para retirar los sedimentos acumulados. Otra opción que apoyaría en la disminución de residuos de mayor tamaño y lodos en la entrada del humedal, sería colocar alguna malla que sirva como colador, antes de que esta entre al tanque contenedor, la cual debería revisarse al menos semanalmente en cuanto a lo que se acumule, para retirarlo. Cabe mencionar que derivado de diversos estudios se propone el considerar que el área del sistema por persona que habita el hogar sea al menos de 2.8-3 m² (Rivas, 2020).

Las plantas ornamentales en los humedales construidos como jardineras florales ¿Cuáles son idóneas?

Como previamente se describió, la vegetación en los humedales es un componente primordial, ya que estas absorben nutrientes (por ejemplo, nitrógeno y fósforo), y también sus raíces adhieren contaminantes, y funcionan para el desarrollo de películas microbianas o formación de grupos de microorganismos, así como también son las responsables del transporte de oxígeno de la atmósfera hasta la rizósfera (zona adyacente de la raíz con el suelo o sustrato). Sumado a lo anterior, las raíces de las plantas liberan exudados de carbono que apoyan en los procesos con ausencia de oxígeno (anaerobio) para la descomposición de otros contaminantes.

Cabe mencionar que inicialmente la vegetación en los humedales construidos fueron plantas de humedales naturales como el tule o junco (*Typha angustifolia*), o el carrizo (*Phragmites australis*) (Vymazal, 2022). En las últimas décadas y principalmente en México, se han utilizado plantas ornamentales florales, la mayoría comunes en áreas terrestres y no en áreas de saturación de agua. Pero diversos han sido los estudios que han comprobado su capacidad de adaptación

a ambientes de humedales y su capacidad de remover contaminantes (Zurita *et al.*, 2025). Además, al ser plantas con producción de flores, estas proveen una mejor estética a la ecotecnología y pueden ser aprovechadas para arreglos florales o dar una mejor vista cuando se implementan como jardineras de tratamiento en los hogares. Las cuales proporcionan pequeñas áreas o ecosistemas que a la par, atraen a los colibrís, mariposas, libélulas y aves. Por lo cual, se aportan ventajas ecológicas y estéticas al entorno, lo cual ayuda en la aceptación y réplica de estas alternativas.

Entre las plantas ornamentales más comunes utilizadas en los humedales construidos, tomando en cuenta siempre el clima donde se instalen los humedales, se encuentran los alcatraces (*Zantedeschia aethiopica*), anturios (*Anturium andraeanum*), cuna de moisés (*Spathiphyllum wallisii*), aves de paraíso (*Strilizia reginae*), heliconias (*Heliconia latispatha*, *Heliconia bourgaeana*) y maracas (*Zingiber spectabile*) (Figura 2).



Figura 2. Plantas ornamentales comunes en humedales construidos. 1. *Anturium andraeanum*, 2. *Heliconia latispatha*, 3. *Heliconia vaginalis*, 4. *Zingiber spectabile*, 5. *Heliconia bourgaeana*, 6. *Alpinia purpurata*, 7. *Sansevieria trifasciata*, 8. *Typha angustifolia*, 9. *Strilizia reginae*, 10. *Zantedeschia aethiopica*, 11. *Hedychium coronarium*, 12. *Spathiphyllum wallisii*. (Elaboración propia)

¿Qué consideraciones se deben tomar en cuenta para la selección y sembrado de las plantas ornamentales en humedales?

Las plantas por utilizar en humedales se sugieren que sean especies de la región, y que puedan encontrarse a orillas de ríos u otras zonas acuáticas, para que sea vegetación mejor adaptada a las condiciones climáticas de la zona y por lo tanto su desarrollo sea óptimo. Respecto al sembrado de las plantas en las celdas, este puede ser mínimo de una planta por metro cuadrado o hasta de tres especies de plantas, algo que se debe tomar en cuenta para ello es saber si es una planta que genera mucha raíz durante su desarrollo como para que sature el área. Especies como el tule (*Typha angustifolia*) o bandera (*Canna hybrids*, *Canna indica*) crecen muy rápido y generan rizomas (tallos subterráneos que crecen horizontalmente con nuevas raíces y brotes), por lo que una planta por metro cuadrado es adecuada. También se debe considerar si hay plantas que puedan dañarse o quemarse por el sol, entonces para estas se debe colocar malla sombra sobre ellas, ejemplo de estas plantas son el anturio (*Anturium andraeanum*,) y la cuna de moisés (*Spathiphyllum wallisii*).

Por otro lado, para asegurar el cuidado y buen desarrollo de las plantas se debe revisar mensualmente la vegetación para retirar hojas o plantas secas, o para evitar que alguna especie sature las celdas de raíces y plantas. Por ello se sugiere buscar opciones de aprovechamiento de las plantas, por ejemplo, el tule (*Typha angustifolia*) se puede usar para realizar tejido de sillas, sombreros, tapetes, canastos, etc., o en el caso de plantas con flores ornamentales, estas se utilizan para realizar arreglos florales (Zamora *et al.*, 2025). La vegetación en el humedal debe verificarse periódicamente en cuanto a posible presencia de plagas o insectos que afecten el desarrollo de estas en el sistema, y si lo hay, utilizar algunos insecticidas ecológicos.

Ejemplo de humedal domiciliario como jardinera con plantas ornamentales

En san José Pastorías, Actopan, Veracruz se ha instalado un sistema de humedal de tratamiento de aguas grises, este funciona desde 2015, su construcción es a partir de celdas que se construyeron junto a la pared de una barda, lo cual disminuyó los gastos (cerca de \$4000) (figura 3). El sustrato utilizado incluye una base de 30 cm de piedra porosa de río de aproximadamente 10-14 cm de diámetro. Arriba de dicha base hay una capa de taparroschas, residuos rugosos plásticos. Posteriormente una capa de grava tezontle. En este sistema se han desarrollado investigaciones que demuestran la eficiencia de remoción de contaminantes y donde se detallan los cambios de materiales, o de plantas que se han utilizado analizando diferentes variables de diseño. Estos sistemas han corroborado remociones de materia orgánica que van del 50% al 90%, así como de otros contaminantes inorgánicos de compuesto nitrogenados, fosforados y de otros iones con remociones de hasta el 92% (Marín-Muñiz *et al.*, 2024a; 2024b).



Figura 3. Humedal construido domiciliario en San José Pastorías, Actopan, Veracruz. (Elaboración propia)

Los humedales construidos demuestran el potencial de uso de soluciones basadas en la naturaleza para atender los desafíos del tratamiento hídrico. El fomentar la replicabilidad de los humedales para mejorar la calidad del agua, y que proveen diferentes propósitos, son una tarea vital para un presente y futuro sostenible. Además, con este tipo de aplicaciones se apoya en caminar hacia el alcance los objetivos de desarrollo sostenible, específicamente en el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), 11 (ciudades y comunidades sostenibles), y objetivo 15 (vida de ecosistemas terrestres). Con esto también se resalta que pequeñas acciones desde el hogar guiarán un mejor camino para un mejor planeta presente y futuro.

Conclusiones

El tratamiento de las aguas residuales con humedales construidos, son una alternativa sustentable que ha sido probada de manera paulatina, principalmente a nivel comunitario, o hasta industrial. Cuando no hay sistemas de tratamiento del agua en las comunidades, colonias, o fraccionamientos, una opción es aplicar estas tecnologías a nivel domiciliario. Este estudio demuestra su utilidad considerando el uso de plantas ornamentales, para tener en traspatio jardineras florales tratadoras del agua. Se resalta el uso de plantas locales adaptadas a las condiciones de clima regional, así como condiciones de diseño y mantenimiento para favorecer la utilidad del sistema a largo plazo. La replicabilidad de estos sistemas provee múltiples beneficios como agua para reutilizar, la creación de un mini ecosistema para nuevas especies y áreas estéticas que provean confort y bienestar al hogar.

Bibliografía

- Gorgoglione, A., & Toretta, V. (2018). Sustainable management and successful application of constructed wetlands: A critical review. *Sustainability*, 10, 3910. <https://doi.org/10.3390/su10113910>
- Marín-Muñiz, J. L. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reuso del agua. *Agroproductividad*, 10(5). <http://revistaagroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1028/879>
- Marín-Muñiz, J. L., Sandoval, L. C., López-Méndez, M. C., Sandoval-Herazo, M., Meléndez-Armenta, R., González-Moreno, R., & Zamora, S. (2023). Treatment wetlands in Mexico for control of wastewater contaminants: A review of experiences during the last twenty-two years. *Processes*, 11, 359. <https://doi.org/10.3390/pr11020359>
- Marín-Muñiz, J. L., Hernández, M. E., & Zamora Castro, S. (2024a). Ornamental plant growth in different culture conditions and fluoride and chloride removal with constructed wetlands. *Hydrology*, 11, 182. <https://doi.org/10.3390/hydrology11110182>
- Marín-Muñiz, J. L., Zamora, S., & González, D. (2024b). Depuración de aguas residuales de la industria láctea con humedales construidos sembrados con policultivos de diferentes densidades de plantas ornamentales. *Universita Ciencia*, 12(33), 32–44. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10955809>
- Mitsch, W. J., Gosselink, J., Anderson, C., & Fennessy, S. (2023). *Wetlands* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Rivas, A. (2020). Experiencias de deficiencias en el diseño de humedales de tratamiento. *Revista Latinoamericana, el Ambiente y las Ciencias*, 11(28), 278–281.
- Rocha Rangel, E., Rodríguez García, J., Martínez Peña, E., & López Hernández, J. (2012). Biomimética: Innovación sustentable inspirada por la naturaleza. *Investigación y Ciencia*, 54, 56–61. <https://www.redalyc.org/pdf/674/67424409007.pdf>
- Vymazal, J. (2022). The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*, 11, 174. <https://doi.org/10.3390/land11020174>
- Zamora-Castro, S. A., Hernández y Orduña, M. G., Moreno-Seceña, J. C., Martínez Escalante, G. A., Sangabriel Lomelí, J., Zitácuaro-Contreras, I., & Marín-Muñiz, J. L. (2025). Maximizing value in constructed wetlands: A review of ornamental plants for wastewater treatment and artisanal applications. *Earth*, 6, 126. <https://doi.org/10.3390/earth6040126>
- Zurita, F., Vera-Puerto, I., Maine, A., Arias, C., & Sandoval, L. C. (2025). Use of constructed wetlands in Latin America: Assessment of current status, opportunities and challenges in Mexico, Chile and Argentina. *Journal of Environmental Management*, 395, 127900. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127900>

Bioaumentación de un inóculo anaerobio y nitrificación parcial de un efluente de rastro municipal para la implementación de un proceso Anammox

Sergio Reyes-Rosas ^{1,2}, Francisco David Franco-Márquez ¹, Óscar Marín-Peña ³, Norma Alejandra Vallejo-Cantú ¹, Alejandro Alvarado-Lassman ^{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 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zongolica. Km 4 Carretera a la Compañía S/N, Tepetitlanapa, Zongolica 95005, Veracruz, México.

³ Estancia Posdoctoral SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación), Tecnológico Nacional de México/ITSde Misantla, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: alejandro.al@orizaba.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Bioprocesos)

Recibido: 13 de junio de 2025 Aceptado: 26 de julio de 2025 Publicado: 10 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.681>

Resumen: El tratamiento de aguas residuales provenientes de rastros municipales representa un desafío ambiental debido a la elevada carga de nitrógeno amoniacal y materia orgánica presente en estos efluentes. En este estudio preliminar se evaluó la adaptación de comunidades bacterianas para el desarrollo de los procesos de nitrificación parcial (NP) y Anammox, con el objetivo de favorecer la remoción de nitrógeno en descargas de rastro municipal. Para ello, se emplearon dos reactores: un reactor anaerobio destinado a la bioaumentación de consorcios bacterianos y un reactor aerobio cónico de 10 L utilizado para la NP. El reactor anaerobio fue operado en dos etapas (intermitente y semicontinua), monitoreándose parámetros como demanda química de oxígeno (DQO), pH, sólidos totales y volátiles, y el volumen de biogás producido. El reactor aerobio fue acondicionado mediante operación por lotes con agua residual de rastro y, posteriormente, se realizaron estudios cinéticos bajo concentraciones controladas de amonio. En el reactor anaerobio se observó una producción estable de biogás (1–1.5 L a 35 °C) bajo condiciones ligeramente alcalinas (pH 7–8), asociadas a actividad metanogénica; adicionalmente, los resultados cinéticos sugieren la presencia de actividad Anammox, evidenciada por el consumo simultáneo de nitrito y amonio. En el reactor aerobio no se logró inicialmente la conversión de amonio a nitrito, observándose acumulación de nitrato; no obstante, tras el acondicionamiento, se detectó una inhibición parcial de la oxidación de nitrito. Los resultados indican que la estabilización del sistema requiere un periodo prolongado de adaptación microbiana, así como ajustes en la aireación y en la carga orgánica aplicada. Los resultados obtenidos permiten identificar condiciones operativas y limitaciones clave que deben considerarse en el diseño y puesta en marcha de sistemas biológicos orientados al tratamiento de aguas residuales de rastros, particularmente en el desarrollo de esquemas sostenibles y de bajo costo.

Palabras clave: agua residual de rastro, Anammox, oxígeno disuelto, comunidades microbianas, bioaumentación, remoción carbono/nitrógeno

Bioaugmentation of an anaerobic inoculum and partial nitrification of municipal slaughterhouse effluent for Anammox process implementation

Abstract: The treatment of wastewater generated from municipal slaughterhouses represents an environmental challenge due to the high ammoniacal nitrogen and organic matter loads present in these effluents. In this preliminary study, the adaptation of bacterial communities was evaluated for the development of partial nitrification (PN) and Anammox processes, with the aim of promoting nitrogen removal from municipal slaughterhouse discharges. For this purpose, two reactors were employed: an anaerobic reactor intended for the bioaugmentation of bacterial consortia and a 10 L conical aerobic reactor used for partial nitrification. The anaerobic reactor was operated in two stages (intermittent and semicontinuous), monitoring parameters such as chemical oxygen demand (COD), pH, total and volatile solids, and the volume of biogas produced. The aerobic reactor was conditioned through batch operation using slaughterhouse wastewater, followed by kinetic studies under controlled ammonium concentrations. In the anaerobic reactor, a stable biogas production (1–1.5 L at 35 °C) was observed under slightly alkaline conditions (pH 7–8), associated with methanogenic activity; additionally, kinetic results suggest the presence of Anammox activity, evidenced by the simultaneous consumption of nitrite and ammonium. In the aerobic reactor, the conversion of ammonium to nitrite was not initially achieved, and nitrate accumulation was observed; however, after the conditioning period, a partial inhibition of nitrite oxidation was detected. The results indicate that system stabilization requires an extended period of microbial adaptation, as well as adjustments in aeration and applied organic loading. The findings allow the identification of key operational conditions and limitations that should be considered in the design and start-up of biological systems for slaughterhouse wastewater treatment, particularly in the development of sustainable and low-cost treatment schemes.

Keywords: slaughterhouse wastewater, Anammox, dissolved oxygen, microbial communities, bioaugmentation, carbon/nitrogen removal

Introducción

El tratamiento biológico de aguas residuales provenientes de la industria cárnica representa un desafío técnico y ambiental de gran relevancia, debido a la alta carga de nutrientes, materia orgánica y microorganismos patógenos que caracterizan estos efluentes. En particular, los rastros municipales generan descargas con elevadas concentraciones de nitrógeno en sus diferentes formas (amonio, nitritos y nitratos), así como compuestos orgánicos fácilmente biodegradables que pueden provocar procesos de eutrofización en cuerpos receptores si no son tratados adecuadamente (Marín-Peña *et al.*, 2024).

Ante esta problemática, el desarrollo de tecnologías sostenibles de bajo costo y requerimientos energéticos moderados se ha vuelto una necesidad prioritaria. En este contexto, los procesos biológicos avanzados como la oxidación anaerobia del amonio (Anammox) y la nitrificación parcial (NP) han demostrado ser alternativas prometedoras para la eliminación eficiente de nitrógeno, reduciendo la dependencia de oxígeno y carbono externo (Singh *et al.*, 2025; Reyes-Rosas *et al.*, 2025).

El proceso Anammox se basa en la capacidad de ciertas bacterias del filo *Planctomycetota* para oxidar amonio utilizando nitrito como aceptor de electrones bajo condiciones anóxicas, generando nitrógeno gaseoso (N_2) como producto final. Este mecanismo biológico no sólo reduce el consumo de energía, sino que también minimiza la producción de lodos en comparación con los sistemas nitrificación–desnitrificaciones convencionales (Reyes-Rosas *et al.*, 2025). Sin embargo, para que la etapa Anammox sea efectiva, es necesario un pretratamiento que acumule nitrito sin formar nitrato, proceso conocido como nitrificación parcial (Owaes *et al.*, 2024).

En la nitrificación parcial, la regulación del oxígeno disuelto juega un papel determinante. La operación bajo condiciones de microareación —es decir, con concentraciones de oxígeno entre 0.2 y 1.0 mg/L— permite favorecer la actividad de bacterias amonio-oxidantes (AOB) e inhibir a las bacterias nitrito-oxidantes (NOB), logrando la acumulación controlada de nitrito (Yang *et al.*, 2015; Owaes *et al.*, 2024). Estrategias recientes como la aireación intermitente y los sistemas de microareación de alta frecuencia han demostrado mejorar la eficiencia del proceso Anammox y de Nitrificación Parcial, al crear gradientes redox favorables para la coexistencia de comunidades aerobias y anóxicas en un mismo reactor (Chi *et al.*, 2021; Loughrin *et al.*, 2025).

Por otro lado, la materia orgánica presente en los efluentes de rastro influye directamente en la dinámica del proceso. Un exceso de carbono biodegradable puede competir con el consumo de nitrito por las bacterias Anammox, reduciendo la eficiencia de eliminación de nitrógeno. Por ello, mantener una relación C/N adecuada (<2) resulta esencial para asegurar la predominancia de las rutas autotróficas (Singh *et al.*, 2025; Kalinčíková & Procházka, 2025).

Considerando lo anterior, la presente investigación se centra en evaluar el efecto combinado de la microaeración y el contenido de carbono (expresado como DQO) sobre la nitrificación parcial de aguas residuales de rastro municipal. El objetivo es establecer las condiciones de operación que permitan una remoción eficiente de nitrógeno y materia orgánica con el menor consumo energético posible, contribuyendo al desarrollo de alternativas sostenibles para el tratamiento de efluentes en la industria cárnica, especialmente en contextos rurales donde los recursos tecnológicos y económicos son limitados (Marín-Peña *et al.*, 2023).

Materiales y Métodos

La bioaumentación de las colonias de bacterias se realizó en un reactor de vidrio de tres bocas con volumen útil de 2.5 L el cual se conectó a una bomba dosificadora marca Kamoer y a un sistema de captación de biogás. Dentro del reactor se encuentra una matriz polimérica de fibras comercial sujeta por un soporte cilíndrico con aberturas circulares. La operación del reactor consistió de dos etapas. En la primera etapa se operó de forma intermitente adicionando y retirando en cada lote dos litros del sustrato el cual estaba conformado por fracción líquida de frutas y verduras con una concentración de 5 gDQO/L. La alimentación se realizó cada segundo día. Para la segunda etapa, se operó en modo semicontinuo retirando 660 ml del reactor y suministrando la misma cantidad del sustrato preparado con 800 mL de fracción líquida de frutas y verduras con una concentración de 5 gDQO/L y como fuente de nitrógeno 60 mL de fracción líquida de camarón con una concentración de 56.3 gDQO/L. Para cada lote, se realizó análisis de DQO total y soluble, medición de pH, así como %ST, %SV, humedad y ceniza. Para la primera etapa se utilizaron 100 ml de biomasa de un

reactor anaerobio de biopelícula que trata residuos sólidos orgánicos urbanos, mientras que para la segunda etapa se contabilizó la biomasa total presente y se retiró la mitad (94 mL).

Para corroborar la presencia de actividad anammox en el reactor, después de las dos etapas se realizó una cinética de 8 horas de duración, retirando 600 mL del licor mezclado del reactor y adicionando 125 mL de solución de amonio, 150 mL de solución de nitritos y 325 mL de fracción líquida de frutas y verduras. Se retiraron muestras cada hora, determinándose la concentración de nitratos, nitritos, amonio y la producción de biogás.

Para el proceso de nitrificación parcial se utiliza un reactor aerobio de fondo cónico con de 10 L y volumen útil de 8 litros conectado a un sistema de aireación por medio de una bomba de aire con un difusor sumergido a la altura de los lodos activados sedimentados en el fondo cónico del reactor. En primera instancia se realizó el acondicionamiento de los lodos activados provenientes del Fideicomiso del Sistema de Aguas Residuales del Alto Río Blanco (FIRIOB) por medio de la alimentación de agua residual del rastro municipal de Orizaba, Ver. a un nivel de aireación de 3.5 ± 0.5 mg O_2/L con una carga de DQO soluble de 1 g/L de forma preliminar. Después de suministrar 8 lotes con una duración de 4 días cada uno, se realizó un estudio cinético con duración de ocho horas para el análisis del comportamiento a través del tiempo de las concentraciones del amoniaco, nitrito y nitrato, así como la remoción de DQO del reactor utilizando un sustrato de frutas y verduras a 1 g DQO/L y la adición de amonio también con una concentración de 1 g/L.

Resultados y Discusión

En la Figura 1 se presenta de manera conjunta la producción de biogás y el pH en el reactor de bioaumentación dividido por una línea punteada, donde los primeros 12 lotes corresponden a la primera etapa de operación del reactor y los 10 lotes posteriores a la segunda etapa. Durante la primera etapa se observa una mayor variabilidad en los valores de pH, mientras que en la segunda etapa se evidencia una estabilización del pH en el efluente, manteniéndose en un rango de 7 a 8. Este intervalo corresponde a un entorno ligeramente alcalino, característico de condiciones favorables para la actividad metanogénica. Con respecto a la producción de biogás, durante la primera etapa se identifica un periodo de aclimatación del sistema, en el cual la producción de biogás es baja, alcanzando valores máximos cercanos a 250 mL en los tres últimos lotes de esta fase; sin embargo, posteriormente se observa un incremento significativo, estabilizándose en valores entre 1 y 1.5 L, lo que sugiera una mejora en la actividad metabólica del consorcio microbiano.

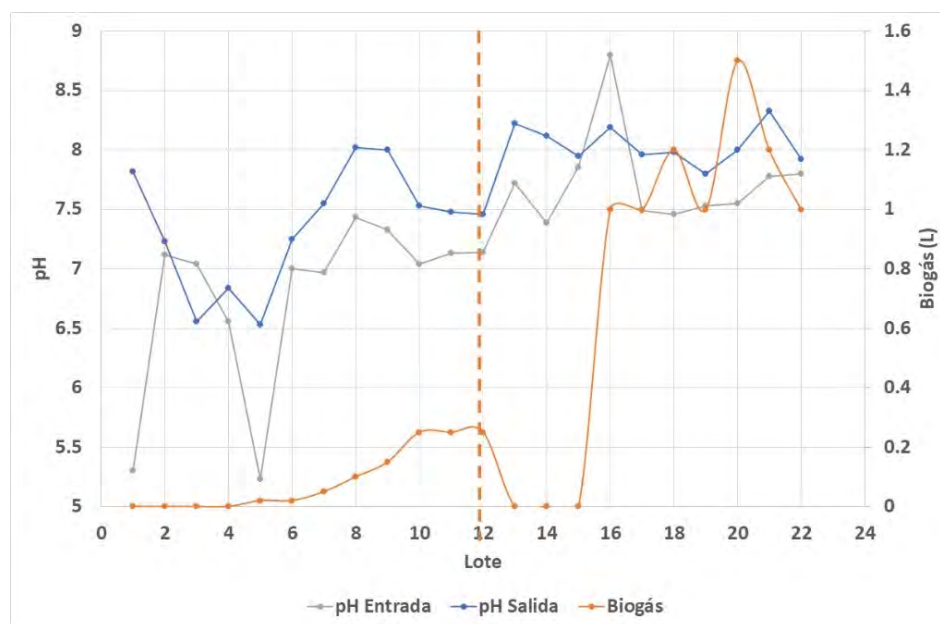


Figura 1. Producción de biogás y pH en el reactor anaerobio de bioaumentación

La Figura 2 muestra los resultados de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO). Durante la primera etapa, los valores de remoción cercanos a cero reflejan la acumulación de carga orgánica dentro del reactor. A partir del lote 6 se comienza a observar valores fluctuantes de remoción de DQO y ya durante la segunda etapa las eficiencias de

remoción se incrementan con promedios de 50.29 % para la DQO soluble y 68.52 % para la DQO total, observándose una tendencia general al incremento, lo que indica una estabilización progresiva del reactor anaerobio.

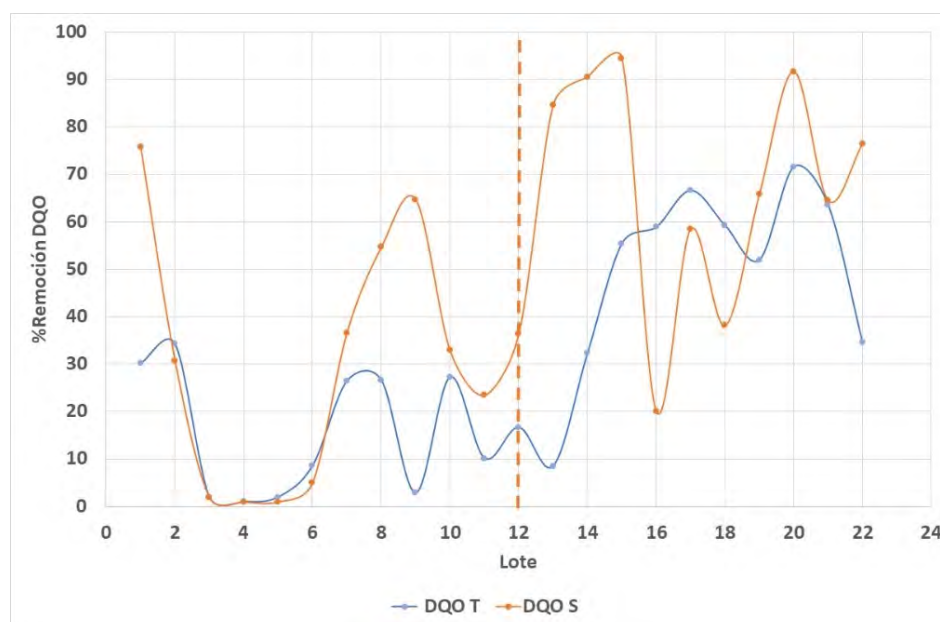


Figura 2. Remoción de la DQO en el reactor de bioaumentación

Para evaluar el éxito del proceso de bioaumentación, se realizó una cinética utilizando como fuente de carbono fracción líquida de frutas y verduras, suplementada con una solución de nitritos y amonio. La cinética se realizó durante ocho horas, durante las cuales se observa la eliminación casi completa de los nitritos y una remoción del 64 % de la DQOs. Así mismo, la concentración de amonio presentó una disminución del 36.47 % lo que sugiere que parte del nitrito fue utilizado en combinación con el amonio por parte de bacterias Anammox, confirmando la actividad de este proceso biológico en el sistema evaluado (Figura 3).

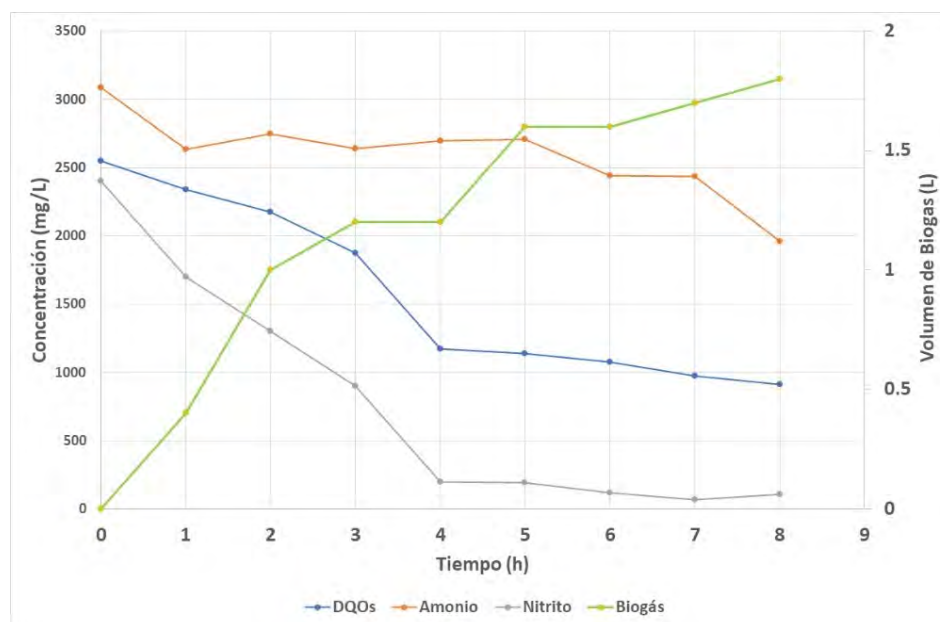


Figura 3. Cinética de degradación de anaerobia de amonio y nitrito

Con respecto al reactor aerobio, se realizó el acondicionamiento del reactor usando sustrato de agua residual de rastro a 1 g DQOs/L. El sustrato presenta concentraciones promedio de 41 mg/L de amonio, 4.0 mg/L de nitrato y no se

observó presencia de nitritos. A lo largo de los lotes, se observan concentraciones fluctuantes de nitrato a la salida del reactor de entre 5 y 25 mg/L y no se registraron nitritos a la salida lo que evidencia un exceso de oxígeno disuelto que promueve la oxidación completa del nitrógeno hacia nitratos. La remoción de la DQO soluble tuvo un promedio de 65.8 % a lo largo de los lotes.

Finalmente se realizó una cinética de 8 horas en el reactor aerobio después del acondicionamiento alimentando fracción líquida de frutas y verduras adicionada con amonio para evaluar su comportamiento (Figura 4).

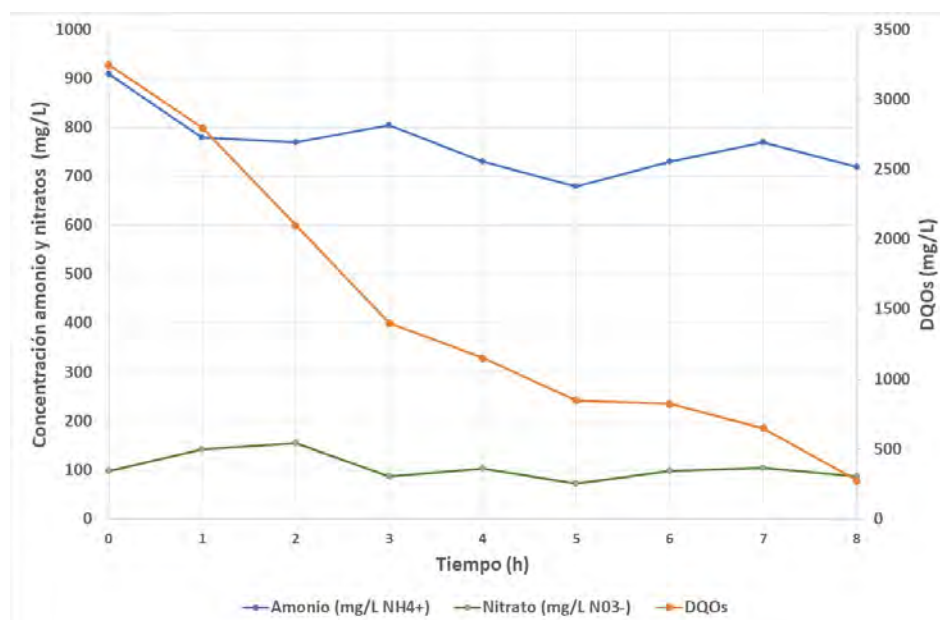


Figura 4. Cinética de degradación aerobia de amonio

Se observa que aun no se tiene una actividad eficiente del lodo aerobio, ya que la remoción de amonio es baja (17 %). En contraste, la remoción de la DQO fue de 93.85 % lo que demuestra que el lodo es capaz de remover de manera eficiente la materia orgánica presente en el agua debido a que el lodo proviene de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas con baja presencia de compuestos nitrogenados.

Conclusiones

De acuerdo con la literatura, el acoplamiento de los procesos Anammox y nitrificación parcial presenta un alto potencial para el tratamiento de la carga de nitrógeno amoniacal presente en las aguas residuales de rastros. Sin embargo, a diferencia de los procesos físicos o estrictamente químicos, los procesos bioquímicos requieren un periodo previo de acondicionamiento, durante el cual las comunidades microbianas se adaptan a las condiciones operativas y a la función metabólica deseada.

El reactor de bioaumentación de colonias Anammox, aunque se encuentra en una etapa temprana de desarrollo, mostró una actividad aceptable considerando que el lodo anaerobio utilizado proviene de un sistema con presencia de compuestos nitrogenados, pero dominado por rutas de desnitrificación. Por otro lado, el reactor aerobio destinado a la nitrificación parcial demostró una elevada eficiencia en la remoción de materia orgánica; no obstante, se requiere un mayor tiempo de adaptación y un ajuste en el sistema de aireación para favorecer el desarrollo de bacterias productoras de nitritos sobre las bacterias nitrificantes completas, con el fin de lograr un acoplamiento más eficiente entre los procesos aerobio y anaerobio.

Agradecimientos y financiamiento: Este proyecto fue desarrollado con financiamiento del Tecnológico Nacional de México con número de proyecto 22008.25-P. Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de maestría otorgada al estudiante Francisco David Franco Márquez.

Bibliografía

- Chi, Y., Shi, X., Jin, P., Wang, X. C., Ren, T., Ren, B., & Jin, X. (2021). Enhanced nitrogen removal by partial nitrification–anammox process with a novel high-frequency micro-aeration (HFMA) mode: Metabolic interactions among functional bacteria. *Bioresource Technology*, 342, 125917. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125917>
- Kalinčíková, Z., & Procházka, J. (2025). Benefits and experiences of partial nitrification in mainstream wastewater treatment. *IWA Specialized Conference Proceedings*, 14(1), 116010. <https://trivent-publishing.eu/img/cms/IWA%2014th%202025/10-%20Zuzana%20Kalinčíková,%20Jindřich%20Procházka.pdf>
- Loughrin, J. H., Silva, P. J., Antle, S. W., Lovanh, N., Vanotti, M. B., & Sistani, K. R. (2025). Design and initial testing of acoustically stimulated anaerobic digestion coupled with effluent aeration for agricultural wastewater remediation. *AgriEngineering*, 7(5), 136. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050136>
- Marín-Peña, O., Sandoval-Herazo, L. C., & Alvarado-Lassman, A. (2023). Implementación de un tratamiento biológico para efluentes de rastros en zonas rurales. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 2(1), 423–432. <https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/article/view/384>
- Marín-Peña, O., Sandoval-Herazo, L. C., & Alvarado-Lassman, A. (2024). Aguas residuales de rastros municipales: El impacto inadvertido en el entorno rural. *Revista de Divulgación Científica iBIO*, 6(1), 153. <http://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/153>
- Owaes, M., Gani, K. M., Kumari, S., & Seyam, M. (2024). Implementation of partial nitrification in wastewater treatment systems by modifications in operational strategies: A review. *Environmental Technology Reviews*, 13(1), 379–397. <https://doi.org/10.1080/21622515.2024.2354518>
- Reyes-Rosas, S., Alvarado-Lassman, A., Marín-Peña, Ó., Landeta-Escamilla, O., Rosas-Mendoza, E. S., & Méndez-Contreras, J. M. (2025). Anammox: Un tratamiento sustentable para el agua residual de rastros. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 4(1), 111–117. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.482>
- Singh, P., Bisen, M., Kulshreshtha, S., Kumar, L., Choudhury, S. R., Nath, M. J., Mandal, M., Kumar, A., & Patel, S. K. S. (2025). Advancement in anaerobic ammonia oxidation technologies for industrial wastewater treatment and resource recovery: A comprehensive review and perspectives. *Bioengineering*, 12(4), 330. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12040330>
- Yang, J., Trela, J., Zubrowska-Sudol, M., & Plaza, E. (2015). Intermittent aeration in one-stage partial nitrification/anammox process. *Ecological Engineering*, 75, 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.016>

Aplicación del proceso de carbonización hidrotérmica empleando cascarilla de arroz para la producción de hidrochar como biocombustible

Víctor Eduardo Ojeda-Rodríguez ¹, Joahnn H. Palacios ², Juan Manuel Méndez-Contreras ¹, Norma Alejandra Vallejo-Cantú ¹, Alejandro Alvarado-Lassman ¹, 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

* Autor de correspondencia: erik.rm@orizaba.tecnm.mx

Energías Renovables (Biocombustibles)

Recibido: 22 de agosto de 2025

Aceptado: 3 de octubre de 2025

Publicado: 14 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.614>

Resumen: El aumento de la población mundial continua en ascenso y esto ocasiona un incremento en la demanda de los recursos existentes para cubrir sus necesidades, por ejemplo, la demanda de alimentos y de energía. Bajo este contexto, el arroz es un producto de alto consumo a nivel mundial y éste genera un residuo de tipo agroindustrial, llamado cascarilla de arroz, que actualmente carece de valor económico y de una adecuada gestión. El desafío global consiste en darle valor agregado a los residuos agroindustriales y encontrar nuevas formas de energía amigables con el medio ambiente. Por ello, el objetivo de esta investigación fue llevar a cabo la carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz para la producción de hidrochar como biocombustible. La carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz se realizó en un reactor de acero inoxidable, modelo CF-1 con capacidad de 1 L, bajo una temperatura de 200 °C durante tres tiempos de reacción que fueron 1, 2 y 3 h. La cascarilla de arroz y los hidrochares fueron analizados mediante pH, humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, cenizas, conductividad eléctrica, análisis elemental y poder calorífico superior (PCS). Como parte de los resultados, se obtuvieron valores de sólidos volátiles 74.82, 74.44 y 74.74 %, cenizas 25.18, 25.56 y 25.26 %, y carbono 39.41, 40.67 y 41.00 %; para los hidrochares carbonizados a 1, 2 y 3 h, respectivamente. Así mismo, los valores del PCS de los hidrochares se mantuvo en un rango de 15.71 a 16.36 MJ/kg. La conversión termoquímica de la cascarilla de arroz contribuye a reducir el volumen de un residuo agroindustrial de difícil manejo y a su vez, proporciona un biocombustible con un PCS mayor que el de la biomasa inicial (14.34 MJ/kg). Al final del estudio, se observó que con un tiempo de una hora sería suficiente para mejorar el PCS con relación a la cascarilla de arroz sin carbonizar.

Palabras clave: cascarilla de arroz, carbonización hidrotérmica, hidrochar, poder calorífico superior, biocombustible

Application of the hydrothermal carbonization process using rice husk for the production of hydrochar as a biofuel

Abstract: The continuous growth of the global population has led to an increasing demand for existing resources to meet basic needs, such as food and energy. In this context, rice is a widely consumed product worldwide and generates an agro-industrial residue known as rice husk, which currently has low economic value and lacks proper management. The global challenge lies in adding value to agro-industrial residues and identifying new environmentally friendly energy sources. Therefore, the objective of this study was to carry out the hydrothermal carbonization of rice husk for the production of hydrochar as a biofuel. Hydrothermal carbonization of rice husk was performed in a stainless-steel reactor (model CF-1) with a capacity of 1 L, at a temperature of 200 °C and reaction times of 1, 2, and 3 h. Rice husk and the resulting hydrochars were analyzed for pH, moisture content, total solids, volatile solids, ash content, electrical conductivity, elemental composition, and higher heating value (HHV). The results showed volatile solids contents of 74.82, 74.44, and 74.74%, ash contents of 25.18, 25.56, and 25.26%, and carbon contents of 39.41, 40.67, and 41.00% for hydrochars produced at 1, 2, and 3 h, respectively. Likewise, the HHV of the hydrochars ranged from 15.71 to 16.36 MJ/kg. The thermochemical conversion of rice husk contributes to reducing the volume of an agro-industrial residue that is difficult to manage while simultaneously providing a biofuel with a higher HHV than that of the raw biomass (14.34 MJ/kg). At the end of the study, it was observed that a reaction time of 1 h was sufficient to improve the HHV compared to untreated rice husk.

Keywords: rice husk, hydrothermal carbonization, hydrochar, higher heating value, biofuel

Introducción

De acuerdo con información reciente, se estima que la población mundial aumentará de 8.5 mil millones en 2030 a 9.7 mil millones en 2050, este hecho es paralelo al crecimiento de la urbanización e industrialización que dependen en gran medida de los combustibles fósiles (ONU, 2017; Meninno, 2023). Así mismo, la industrialización implica el consumo de hidrocarburos y, por lo tanto, el aumento en la liberación de contaminantes hacia la atmósfera y ecosistemas terrestres y marinos (Chen *et al.*, 2024). Por ello, existe una urgencia de abordar el cambio climático y problemas ambientales

(Ischia *et al.*, 2024), así como la necesidad de satisfacer las necesidades alimenticias. Por otro lado, la proyección de la demanda de productos agrícolas global, debido al aumento poblacional, para el año 2050 será de un 60 % (Hamidu *et al.*, 2025).

Dentro de los productos agrícolas de mayor consumo se encuentra el arroz, que es un cereal considerado como un alimento básico para aproximadamente la mitad del mundo (Nzereogu *et al.*, 2023). Por ejemplo, en México durante el periodo 2022–2023, la producción de arroz fue aproximadamente 157 mil toneladas (SIAP, 2023a). Derivado del consumo de arroz se obtienen dos tipos de residuos principales que son la paja y la cascarilla de arroz (CA). La CA es la capa exterior del grano de arroz (Bushra y Remya, 2020) y representa el 20 % del peso total del grano (Naranjo *et al.*, 2023), cuenta con una baja densidad aparente, la cual va de 96 a 140 kg/m³ (Nzereogu *et al.*, 2023). La CA es un tipo de biomasa lignocelulósica que consiste principalmente en: celulosa (35 %), hemicelulosa (30 %) y lignina (18 %) (Nizamuddin *et al.*, 2018). Como parte de sus propiedades destacan: contenido de humedad (4.5–10.8 %), materia volátil (70.2–78.5 %), contenido de cenizas (3.4–17 %) y de carbono fijo (3.4–19.8 %) (Bushra y Remya, 2020). Sin embargo, la CA también presenta alto contenido de sílice (18–25 %) del peso total (Kordi *et al.*, 2023), lo cual hace que este residuo sea de difícil manejo y aprovechamiento como típicamente son aprovechados otros residuos agrícolas.

Dentro de las alternativas de aprovechamiento de la CA, puede emplearse la carbonización hidrotérmica (CHT), que es un proceso termoquímico llevado a cabo en presencia de agua comprimida en un rango de 180 a 250 °C (Higgins *et al.*, 2020) y bajo presiones autógenas de alrededor de 4 MPa (Ighalo *et al.*, 2025). La CHT se considera un proceso sostenible debido al ahorro energético operativo y eliminación de etapas de pretratamiento de las muestras (Pauline y Joseph, 2020; Orzama-Hugo *et al.*, 2024; Selvaraj *et al.*, 2025). Los productos principales resultantes de la CHT son: 1) Una fase sólida rica en carbono conocida como hidrochar, 2) Una fase líquida abundante en compuestos orgánicos referida como agua de proceso (Ischia *et al.*, 2024) y 3) Gas de síntesis, conformado principalmente por CO₂ y CO (Higgins *et al.*, 2020).

Recientemente, se han realizado diversas aplicaciones de la CHT utilizando CA bajo distintas condiciones de operación, entre ellas destacan: 1) Nizamuddin *et al.* (2018), efectuaron el proceso CHT con microondas, a 220 °C durante 30 min. El rendimiento de hidrochar fue 35.9 % con un PCS de 16.10 MJ/kg, utilizado como adsorbente, secuestrador de carbono y remediador de suelos para la agricultura. 2) Danso-Boateng *et al.* (2020), evaluaron la capacidad de adsorción del hidrochar obtenido a 200 °C por 20 h, observando que después del proceso existe un aumento de C y disminución de O, pasando de un 53.7 a un 74.1 % de C. 3) Hossain *et al.* (2020), evaluaron las propiedades del hidrochar como combustible y adsorbente, obteniendo hidrochar a 180 °C durante 20 min de reacción con un PCS entre 20.27 y 19.02 MJ/kg. 4) Yang *et al.* (2021), efectuaron una co-CHT con CA y un carbón de la región de Zhundong a 200 °C durante 2 h y el hidrochar tuvo una composición del 98.9 % de SiO₂ en las cenizas. 5) Li *et al.* (2021), adicionaron cloruros metálicos al agua de alimentación de la CHT para evaluar la mejoría de la carbonización y ésta adición afectó directamente los rendimientos de hidrochar del 28.97 % al 47.10 %.

De acuerdo con las condiciones de operación y aplicaciones analizadas anteriormente, se identificó la necesidad de hacer una evaluación de la CHT de CA con una temperatura de trabajo intermedia y tiempos moderados. En este sentido, la novedad de este trabajo consiste en emplear la CHT a 200 °C durante 1, 2 y 3 horas, buscando tener un proceso rentable para la obtención de hidrochar como biocombustible. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es llevar a cabo la carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz para la producción de hidrochar como biocombustible.

Materiales y Métodos

A continuación, se describen los métodos empleados para la caracterización de la cascarilla de arroz y el hidrochar. De igual manera, se explica el proceso de CHT para la producción de hidrochar, así como la determinación del poder calorífico superior (PCS):

Recolección y caracterización de la cascarilla de arroz

Como materia prima se utilizó la cascarilla de arroz proporcionada por una planta procesadora de alimentos de la ciudad de Orizaba, Veracruz, México, la cual aproximadamente genera 10,000 t/mes de CA. La CA fue transportada y almacenada en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental I del Instituto Tecnológico de Orizaba para su análisis. Como parte del estudio, se realizó una caracterización fisicoquímica por triplicado mediante: pH por la determinación TAPPI

T252 om-90, contenido de humedad y sólidos totales por el método gravimétrico 2540 B, contenido de sólidos volátiles y cenizas mediante método gravimétrico 2540 E. Adicionalmente, se determinó la conductividad eléctrica (CE) mediante un conductímetro (HANNA® Instruments, HI98130, USA). Así mismo, se llevó a cabo un análisis elemental, en un analizador (Perkin Elmer, PE2400, USA) para la determinación de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre. El contenido de oxígeno se determinó por diferencia utilizando CHNS y cenizas.

Carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz

Debido a que la cascarilla de arroz presentó un bajo contenido de humedad, ésta se sometió a molienda y se hidrató bajo la relación másica 1:3, cascarilla de arroz:agua. Después de la hidratación, la humedad de la CA fue del 75.58 ± 2.40 %. Con este valor, se obtuvo el porcentaje mínimo de humedad (70 %) de operación del proceso de CHT (Pagés-Díaz y Huiliñir, 2020). La CHT se llevó a cabo en un reactor de acero inoxidable de alta presión (Toption Instruments, CF-1, China), con capacidad de 1 L, como se muestra en la Figura 1. Se efectuaron tres carbonizaciones manteniendo la temperatura de 200 °C, pero con diferentes tiempos de reacción (1, 2 y 3 horas). La CHT fue evaluada a 200 °C debido a que es una temperatura intermedia dentro del rango de operación del proceso.



Figura 1. Reactor de carbonización hidrotérmica

Caracterización del hidrochar y determinación del poder calorífico superior (PCS)

A partir del análisis elemental y el contenido de cenizas, se determinó el PCS teórico por medio de la Ecuación 1, empleada por Parikh y Chinniwala (2002):

$$PCS (MJ/kg) = 0.3491 * C + 1.1783 * H + 0.1005 * S - 0.1034 * O - 0.015 * N - 0.0211 * \text{Cenizas} \quad (1)$$

Donde: C = Carbono (%), H = Hidrógeno (%), S = Azufre (%), O = Oxígeno (%), N = Nitrógeno (%) y Cenizas = (%). Todos los porcentajes expresados en peso.

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de la cascarilla de arroz y de los hidrochares obtenidos a partir de la CHT:

Caracterización de la cascarilla de arroz

Los resultados de la caracterización fisicoquímica, CE, análisis elemental y PCS de la CA se muestran en la Tabla 1. De igual forma, se presenta una comparación de los resultados obtenidos con otras investigaciones reportadas en literatura.

A partir de la medición del pH se observa que la CA presentó un valor cercano a la neutralidad, similar al reportado por Nwajiaku *et al.* (2018), que son los valores típicos del pH de la CA. Ahora bien, haciendo una comparación en el contenido de humedad de la muestra, se obtuvo un valor superior a lo reportado por los demás autores. Sin embargo, aunque el porcentaje de humedad de la CA analizada en esta investigación fue de 10.30 ± 0.09 %, se observó que es insuficiente para que la biomasa pueda ser sometida al proceso de CHT, debido a que el proceso requiere por lo menos el 70 % de humedad de acuerdo con Pagés-Díaz y Huiliñir (2020). Por ello, se requiere de una hidratación para satisfacer esta condición inicial de la CA. Por otro lado, de acuerdo con el 78.71 ± 0.19 % de SV, indicó la disponibilidad de la materia orgánica presente en la muestra para que se puede realizar la carbonización. Cabe mencionar que, debido a la temperatura intermedia de operación (200 °C), solamente se carbonizaron las cadenas orgánicas de bajo peso molecular, como son los azúcares y las grasas presentes en la CA; pero en cuanto a la celulosa, hemicelulosa y lignina no se carbonizaron debido a que requieren de temperaturas superiores a los 220 °C (Jia *et al.*, 2022). En cuanto al contenido de cenizas, la CA mostró una composición del 21.29 ± 0.19 %, este valor es superior al reportado por Nwajiaku *et al.* (2018) y Steven *et al.* (2021), tal como se muestra en la Tabla 1. Es importante mencionar que, de acuerdo con Steven *et al.* (2021), entre el 83.6 y 93.5 % del contenido de cenizas corresponde al sílice presente en la CA. La presencia de sílice en la CA hace que este tipo de residuo sea de difícil manejo, las limitantes por su alta concentración de sílice son: 1) Los animales no pueden digerirla y 2) La alta resistencia a ser quemada (Ojeda-Rodríguez *et al.*, 2024). Por otro lado, la conductividad eléctrica fue de 373.67 ± 8.08 $\mu\text{S}/\text{cm}$, un valor cercano al reportado por Nwajiaku *et al.* en 2018. En cuanto al análisis elemental, el contenido de C fue del 36.70 ± 0.42 %, el cual contrasta con el valor reportado por Hossain *et al.* (2020), siendo 25.9 %. También, se puede observar en la Tabla 1 que los porcentajes de H, N y S son similares a los encontrados por Hossain *et al.* (2020). Sin embargo, Steven *et al.* (2021), mencionan un contenido de C similar con valor de 36.60 %, pero porcentajes superiores de H y N. La presencia de CHON en la CA, especialmente la del C es altamente favorable para el hidrochar, ya que se trata de un residuo sólido rico en C.

Tabla 1. Resultados de la caracterización de la CA y comparada con otros autores

Referencia	Parámetro											
	pH	Hum. (%)	ST (%)	SV (%)	Cen. (%)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	PCS (MJ/kg)
Resultados de esta investigación	6.79 ± 0.01	10.30 ± 0.09	89.70 ± 0.09	78.71 ± 0.19	21.29 ± 0.19	373.67 ± 8.08	36.70 ± 0.42	4.94 ± 0.04	0.32 ± 0.27	0.04 ± 0.04	37.36	14.34
Nwajiaku <i>et al.</i> (2018)	6.5	-	-	-	11.5	330	-	-	-	-	-	-
Hossain <i>et al.</i> (2020)	-	7.5	-	-	-	-	25.9	4.7	0.6	0.3	-	14.53
Steven <i>et al.</i> (2021)	-	9.3	-	-	17.6	-	36.60	5.83	3.31	-	36.65	14.01

Hum. = Humedad, Cen. = Cenizas

La razón por la cual las propiedades de la CA evaluada en esta investigación son diferentes a las reportadas en literatura, pueden atribuirse a que el arroz procesado en este caso de estudio, y por lo tanto sus desechos, esta constituido por el arroz nacional más el arroz importado de países como India, Tailandia, Vietnam y Pakistán (SIAP, 2023b); los cuales son cultivados bajo diferentes condiciones ambientales, entre ellas destacan: tipo de suelo, clima de cada región de cultivo y temporada de siembra y de cosecha.

Productos obtenidos de la CHT

Durante cada carbonización se utilizaron 150 g de CA y 450 g de agua, para tener una masa total de 600 g. Ahora bien, el hidrochar es el producto principal de la CHT, para este caso el rendimiento del hidrochar mostró un ligero comportamiento ascendente del 72 al 76.67 %. El rendimiento de hidrochar puede ser variable debido a que usualmente la CA procedente de las plantas procesadoras de alimentos no presenta un tamaño homogéneo. Además del tamaño de la cascarilla de arroz, el rendimiento del hidrochar depende de las características de la biomasa inicial y relación de agua:biomasa. Sin embargo, la temperatura y tiempo de reacción tienen influencia sobre el proceso de CHT, por ejemplo, emplear temperaturas y tiempos de reacción bajos, conducen a un alto rendimiento del hidrochar (Masoumi *et al.*, 2021; Romano *et al.*, 2023). El agua obtenida del proceso de CHT cuenta con propiedades para ser empleada y valorizada por otro tipo de procesos como: sustrato en digestión anaerobia, fertilizante líquido, material de co-carbonización hidrotérmica, entre otros, sin embargo; para efectos de esta investigación el agua de proceso no

fue analizada. Por otro lado, el gas de síntesis representa una fracción másica despreciable. En la Tabla 2 se observan los resultados de los productos obtenidos a partir de la CHT.

Tabla 2. Productos obtenidos del proceso de CHT a 200 °C

Tiempo de reacción (h)	Gas de síntesis (mL)	Agua de proceso (g)	Hidrochar (g)	Rendimiento de hidrochar (%)
1	2,590	461	108	72.00
2	2,920	474	114	76.00
3	2,690	425	115	76.67

Caracterización del hidrochar

En la Tabla 3, se observan los resultados de la caracterización realizada a los hidrochares obtenidos a 200 °C y 1, 2 y 3 horas, respectivamente. El pH del hidrochar mostró un comportamiento ligeramente descendente conforme incrementó el tiempo de reacción, disminuyendo de 3.86 ± 0.02 a 3.65 ± 0.02 debido a la descomposición de la CA y generación de compuestos ácidos. Pero, a diferencia de este trabajo en donde se modificaron los tiempos de reacción, cuando el proceso de CHT es evaluado con incrementos de temperatura, el pH adquiere un comportamiento básico debido a la disminución de especies ácidas en el medio y por lo tanto una hidrólisis más efectiva (Lozano-Pérez y Guerrero-Farjado, 2024). El contenido de humedad presentó valores entre 5.78 ± 0.05 y 8.28 ± 0.19 %, y esto tuvo una relación directa en el contenido de ST como se puede apreciar en la Tabla 3. Los SV indicaron una disminución después del proceso de CHT con respecto a la CA antes de su carbonización, obteniéndose valores de 74.44 ± 0.16 a 74.82 ± 0.12 %, lo cual demostró un comportamiento homogéneo a pesar de los cambios de tiempo de reacción. De manera similar, Masoumi *et al.* (2021), destacaron que, a medida que incrementa el tiempo de reacción existe una mayor eliminación de compuestos volátiles, debido a la disminución de los compuestos orgánicos que conforman la materia volátil, mientras que los compuestos inorgánicos tienden a concentrarse. Ahora bien, los compuestos inorgánicos conforman las cenizas y se observó que la CA después del proceso de CHT incrementó su contenido de cenizas en los hidrochares, obteniéndose valores de 25.18 ± 0.12 , 25.56 ± 0.16 y 25.26 ± 0.20 % para los tiempos de reacción de 1, 2 y 3 horas, respectivamente. Estos valores son cercanos a los reportados por Yang *et al.* (2021), ya que encontraron hidrochar procedente de CA con 21.99 % de cenizas. Así mismo, la CE de los hidrochares tuvo valores superiores en comparación con la CA sin carbonizar, pero se observó que a medida que incrementa el tiempo de reacción, hay una disminución en este parámetro. Este comportamiento descendente observado de la CE es congruente, debido a que (Pauline y Joseph, 2020) reportaron que la CE disminuye su valor a medida que se prolonga el tiempo de reacción de la CHT, debido a una producción mayor en la cantidad de grupos funcionales oxigenados, lo cual irrumpe la conductividad eléctrica.

Tabla 3. Resultados de la caracterización de hidrochares obtenidos a 200 °C durante tres tiempos de reacción diferentes

Tiempo de reacción (h)	Parámetro										
	pH	Hum. (%)	ST (%)	SV (%)	Cen. (%)	CE (μS/cm)	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
1	3.86 ± 0.02	6.05 ± 0.05	93.95 ± 0.05	74.82 ± 0.12	25.18 ± 0.12	792.67 ± 6.81	39.41 ± 0.24	4.77 ± 0.03	0.30 ± 0.00	0.00 ± 0.04	30.33
2	3.84 ± 0.02	5.78 ± 0.05	94.22 ± 0.05	74.44 ± 0.16	25.56 ± 0.16	766.67 ± 12.90	40.67 ± 0.29	4.79 ± 0.02	0.23 ± 0.00	0.00 ± 0.00	28.75
3	3.65 ± 0.02	8.28 ± 0.19	91.72 ± 0.19	74.74 ± 0.20	25.26 ± 0.20	663.67 ± 8.33	41.00 ± 0.41	4.71 ± 0.03	0.23 ± 0.02	0.00 ± 0.03	28.77

El análisis elemental de los hidrochares presentó un incremento en el contenido de C a medida que se prolongó el tiempo de reacción, creando una ligera tendencia positiva. El contenido de C para los hidrochares obtenidos a 1, 2 y 3 horas fue de 39.41 ± 0.24 , 40.67 ± 0.29 y 41.00 ± 0.41 %, respectivamente. Mientras tanto, Yang *et al.* (2021), reportaron

un valor muy cercano el cual fue 41.56 %, sin embargo; Nizamuddin *et al.* (2018) y Hossain *et al.* (2020) encontraron 47.2 % de C. Así mismo, en la Tabla 3 se puede notar una disminución en las concentraciones de H y O a medida que se incrementa el tiempo de reacción, debido a que las reacciones responsables de estas disminuciones son la deshidratación y descarboxilación (Masoumi *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021). El incremento en los porcentajes de C y la disminución en los porcentajes de H y O, como resultado de la CHT, son debido a la descomposición de la CA, es decir; a medida que el H y el O se eliminan como H₂O y CO₂, el C se concentra en el hidrochar. Finalmente, la concentración de N fue muy baja en comparación con el CHO y la presencia de S fue prácticamente despreciable.

Hum. = Humedad, Cen. = Cenizas

Análisis del PCS del hidrochar proveniente de la cascarilla de arroz

A partir de la Ecuación 1, los resultados del PCS para el hidrochar de 1, 2 y 3 horas fueron de 15.71, 16.33 y 16.36 MJ/kg, respectivamente, como se presenta en la Tabla 4. Debido a este comportamiento, se observó que a medida que incrementa el tiempo de reacción, mayor es el PCS obtenido por el hidrochar. Pero se presentó una limitante, la cual fue el contenido de cenizas del hidrochar, ya que no permite obtener un PCS mayor a pesar del incremento en el tiempo de reacción de la carbonización hidrotérmica. Por ejemplo, para el caso de los hidrochares obtenidos durante 2 y 3 horas, existió una diferencia de 0.03 MJ/kg en el PCS. Haciendo una comparación de estos resultados con otros autores, se encontró que Nizamuddin *et al.* (2018), realizaron una CHT a mayor temperatura y menor tiempo, obteniendo 16.10 MJ/kg, mientras que Hossain *et al.* (2020), trabajaron a una temperatura y tiempo de reacción menores obteniendo un PCS de 20.27 MJ/kg, pero con un contenido de cenizas del 9.4 %. Las similitudes o diferencias de los resultados de esta investigación con respecto a los demás autores, pueden también ser atribuidos a la región en la cual el arroz fue cultivado, a las prácticas agrícolas del cultivo de arroz y a la composición fisicoquímica de la CA como materia de la CHT. Finalmente, los hidrochares procesados por medio de CHT a partir de la CA, se pueden aplicar en la generación de calor y electricidad por medio de combustión en sustitución de combustibles como el carbón vegetal.

Tabla 4. Resultados del PCS de los hidrochares a partir de la CA bajo diferentes condiciones de reacción y su comparación con otros autores

Autor	Condición de operación	PCS (MJ/kg)
Nizamuddin <i>et al.</i> (2018)	220 °C / 30 min	16.10
Hossain <i>et al.</i> (2020)	180 °C / 20 min	20.27
Resultados de la presente investigación	200 °C / 1 h	15.71
	200 °C / 2 h	16.33
	200 °C / 3 h	16.36

Conclusiones

Esta investigación tuvo como propósito realizar la carbonización hidrotérmica de la cascarilla de arroz procedente de una planta procesadora de alimentos para producir hidrochar como biocombustible a 200 °C y tiempos de 1, 2 y 3 horas. La cascarilla de arroz resultó ser un residuo con bajo contenido de humedad, la cual tuvo que ser hidratada, pero con características valorizables, entre ellas su contenido de C, para aplicar un tratamiento termoquímico como la carbonización hidrotérmica y aprovechar una biomasa que no cuenta con un adecuado plan de gestión. Derivado de la carbonización hidrotérmica, se obtuvieron tres productos: hidrochar, agua de proceso y gas de síntesis, siendo el hidrochar el producto más abundante con un rendimiento superior al 70 %. A partir de la caracterización del hidrochar, se observó que es un producto con pH ácido y con elevada presencia de cenizas atribuidas a la cantidad de sílice como material inherente de la cascarilla de arroz. El PCS tuvo valores entre 15.71 y 16.36 MJ/kg, lo cual indicó que en términos de tiempo de reacción, con una hora bastaría mejorar el PCS con relación a la cascarilla de arroz sin carbonizar. El proceso de carbonización hidrotérmica demostró aportar una reducción en el volumen de la cascarilla de arroz y obtener un biocombustible como el hidrochar.

Como trabajos futuros, se esperan analizar otras condiciones de operación del proceso de carbonización hidrotérmica con la finalidad de analizar la factibilidad del proceso en términos de rendimiento y PCS, así como evaluar el agua de proceso como producto para otras aplicaciones.

Agradecimientos y financiamiento: Al Tecnológico Nacional de México por el apoyo para la realización de esta investigación por medio del proyecto financiado con número 22524.25-P. A la SECIHTI por la beca nacional con número de registro 4008729.

Bibliografía

- Bushra, B., & Remya, N. (2020). Biochar from pyrolysis of rice husk biomass – characteristics modification and environmental application. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 5759–5770. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01092-3>
- Chen, Z., Gou, Y., & Lou, L. (2024). A critical review of hydrochar based photocatalysts by hydrothermal carbonization: synthesis, mechanisms, and applications. *Biochar*, 6, 74. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00364-9>
- Danso-Boateng, E., Mohammed, A. S., Sander, G., Wheatley, A. D., Nyktari, E., & Usen, I. C. (2021). Production and characterisation of adsorbents synthesised by hydrothermal carbonisation of biomass wastes. *SN Applied Sciences*, 3, 257. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04273-5>
- Hamidu, I., Afotey, B., Kwakye-Awuah, B., & Anang, D. A. (2025). Synthesis of silica and silicon from rice husk feedstock: A review. *Heliyon*, 11(4), e42491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42491>
- Higgins, L. J. R., Brown, A. P., Harrington, J. P., Ross, A. B., Kaulich, B., & Mishra, B. (2020). Evidence for a core-shell structure of hydrothermal carbon. *Carbon*, 91, 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.01.060>
- Hossain, N., Nizahuddin, S., Griffin, G., Selvakannan, P., Mubarak, N. M., & Indra-Mahlia, T. M. (2020). Synthesis and characterization of rice husk biochar via hydrothermal carbonization for wastewater treatment and biofuel production. *Scientific Reports*, 10, 18851. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75936-3>
- Ighalo, J. O., Akaeme, F. C., Georgin, J., De Oliveira, J. S., & Franco, D. S. P. (2025). Biomass hydrochar: A critical review of process chemistry, synthesis methodology, and applications. *Sustainability*, 17(4), 1660. <https://doi.org/10.3390/su17041660>
- Ischia, G., Berge, N. D., Bae, S., Marzban, N., Román, S., Farru, G., Wilk, M., Kulli, B., & Fiori, L. (2024). Advances in research and technology of hydrothermal carbonization: Achievements and future directions. *Agronomy*, 14(5), 955. <https://doi.org/10.3390/agronomy14050955>
- Jia, J., Wang, R., Chen, H., Liu, H., Xue, Q., Yin, Q., & Zhao, Z. (2022). Interaction mechanism between cellulose and hemicellulose during the hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass. *Energy Science & Engineering*, 10, 2076–2087. <https://doi.org/10.1002/ese3.1117>
- Kordi, M., Farrokhi, N., Pech-Canul, M. I., & Ahmadikhah, A. (2023). 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>
- Li, Y., Hagos, F. M., Chen, R., Qian, H., Mo, C., Di, J., Gai, X., Yang, R., Pan, G., & Shan, S. (2021). Rice husk hydrochars from metal chloride-assisted hydrothermal carbonization as biosorbents of organics from aqueous solution. *Bioresources and Bioprocessing*, 8. <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00451-w>
- Lozano-Pérez, A. S., & Guerrero-Farjado, C. A. (2024). Liquid Hot Water (LHW) and hydrothermal carbonization (HTC) of coffee berry waste: Kinetics, catalysis and optimization for the synthesis of platform chemicals. *Sustainability*, 16(7), 2845. <https://doi.org/10.3390/su16072854>
- Masoumi, S., Borugadda, V. B., Nanda, S., & Dalai, A. K. (2021). Hydrochar: A review on its production technologies and applications. *Catalysts*, 11, 939. <https://doi.org/10.3390/catal11080939>
- Meninno, S. (2023). Organocatalytic upgrading of biomass derived building blocks. *European Journal of Organic Chemistry*, 26. <https://doi.org/10.1002/ejoc.202300264>
- Naranjo, J., Juiña, E., Loyo, C., Romero, M., Vizuete, K., Debut, A., Ponce, S., & Murillo, H. A. (2023). Preparation of adsorbent materials from rice husk via hydrothermal carbonization: Optimization of operating conditions and alkali activation. *Resources*, 12(12), 145. <https://doi.org/10.3390/resources12120145>
- Nizamuddin, S., Hussain-Siddiqui, M. T., Ahmed-Baloch, H., Mujawar-Mubarak, N., Griffin, G., Madapusi, S., & Tanksale, A. (2018). Upgradation of chemical, fuel, thermal, and structural properties of rice husk through microwave-assisted hydrothermal carbonization. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 17529–17539. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1876-7>
- Nwajiaku, I. M., Olanrewaju, J. S., Sato, K., Tokunari, T., Kitano, S., & Masunaga, T. (2018). Change in nutrient composition of biochar from rice husk and sugarcane bagasse at varying pyrolytic temperatures. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7, 269–276. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0213-y>
- Nzereogu, P. U., Omah, A. D., Ezema, F. I., Iwuoha, E. I., & Nwanya, A. C. (2023). Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications. *Hybrid Advances*, 4, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111>
- Ojeda-Rodríguez, V. E., Escobar-Morales, B., Méndez-Contreras, J. M., Vallejo-Cantú, N. A., Alvarado-Lassman, A., & Rosas-Mendoza, E. S. (2024). Cascarilla de arroz, un residuo agrícola sin ser aprovechado en México. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 105–110. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.319>
- ONU. (2017). Organización de las Naciones Unidas. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. <https://www.un.org/es/desa/world-population-prospects-2017>
- Orzama-Hugo, R., Naranjo, J., Gavilanez-Alvarez, I., Cando, V. M., Tixi-Gallegos, K., Sánchez-Moreno, H., Londo, F., Danilo-Gavilanez, O., & Coello-Cabezas, J. (2024). Production of hydrochar by low-temperature hydrothermal carbonization of residual biomass from cocoa production for mercury adsorption in acidic aqueous solutions. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100938. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100938>

- Pagés-Díaz, J., & Huiliñir, C. (2020). Valorization of the liquid fraction of co-hydrothermal carbonization of mixed biomass by anaerobic digestion: Effect of the substrate to inoculum ratio and hydrochar addition. *Bioresource Technology*, 317, 123989. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123989>
- Parikh, P. P., & Channiwala, S. A. (2002). A unified correlation for estimating HHV for solid, liquid and gaseous fuel. *Fuel*, 81, 1051–1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)
- Pauline, A. L., & Joseph, K. (2020). Hydrothermal carbonization of organic wastes to carbonaceous solid fuel – A review of mechanisms and process parameters. *Fuel*, 279, 118472. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118472>
- Romano, P., Stampone, N., & Di Giacomo, G. (2023). Evolution and prospects of hydrothermal carbonization. *Energies*, 16(7), 3125. <https://doi.org/10.3390/en16073125>
- Selvaraj, P. S., Ettiyagounder, P., Sabarish, K., Periasamy, K., Rengasamy, B., Veeraswamy, D., Karchiyappan, T., & Kathirvel, S. (2025). Hydrothermal carbonization approach for transforming biomass waste to value added hydrochar and its applications in water remediation. *Desalination and Water Treatment*, 322, 101199. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101199>
- SIAP. (2023a). *Expectativas agroalimentarias 2023*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap>
- SIAP. (2023b). *Panorama agroalimentario: Agricultura regenerativa, la vía para un futuro sustentable*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/siap>
- Steven, S., Restiawaty, E., & Bindar, Y. (2021). Routes for energy and bio-silica production from rice husk: A comprehensive review and emerging prospect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111329. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111329>
- Yang, L., Wang, H., Zhu, J., Sun, W., Xu, Y., & Wu, S. (2021). Co-combustion and ash characteristics of Zhonggong coal with rice husk hydrochar prepared by the hydrothermal carbonization technology for co-combustion. *Renewable Power Generation*, 16(2), 329–338. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12324>

Transformación comunitaria a través de proyectos socioambientales: Centro de apoyo a proyectos Sustentables, CAPS - La Salle, México

Mario Moliner-Pérez ^{1,*}, Brenda Lizette Ruiz-Herrera ¹, María de los Ángeles Garriga-González ²

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad La Salle México. Benjamín Franklin No. 45, Col. Condesa, Alcaldía Cuauhtémoc, C.P. 06140, CDMX, México

² Desarrollo Social y Comunitario, Universidad La Salle México. Benjamín Franklin No. 45, Col. Condesa, Alcaldía Cuauhtémoc, C.P. 06140, CDMX, México

* Autor de correspondencia: mario.moliner@lasalle.mx; Tel: 52 5578 9500 ext. 2718

Desarrollo Sustentable (Desarrollo social y comunitario)

Recibido: 12 de junio de 2025

Aceptado: 13 de agosto de 2025

Publicado: 22 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.500>

Resumen: El Centro de Apoyo a Proyectos Sustentables (CAPS) de la Universidad La Salle México se ha consolidado como un espacio clave para el desarrollo de proyectos socioambientales, integrando la sustentabilidad y la ecología integral. Este trabajo pretende impulsar el desarrollo de proyectos sustentables e integrales, ejemplificando cómo un centro académico puede impactar positivamente en la comunidad y mejorar la calidad de vida de sus participantes a través de actividades educativas. Los proyectos socioambientales desarrollados en el CAPS permiten a los estudiantes aplicar sus conocimientos teóricos en contextos reales, abordando problemáticas ambientales y sociales de manera directa. A través de estas experiencias, los estudiantes no solo adquieren habilidades prácticas, sino que también desarrollan una conciencia crítica y un sentido de responsabilidad hacia su entorno. La relevancia del CAPS en la formación de estudiantes radica en su capacidad para fomentar una educación integral, preparándolos para ser agentes de cambio en sus comunidades, capaces de enfrentar los retos del mundo actual, promoviendo la formación de individuos comprometidos y conscientes de su papel en la construcción de un futuro sostenible.

Palabras clave: Sustentabilidad, Proyectos Socioambientales, Ecología Integral, Educación Ambiental

Community transformation through Socio-Environmental Projects: Sustainable Projects Center (CAPS) - La Salle, Mexico

Abstract: The Sustainable Projects Center (CAPS) at La Salle University Mexico has established itself as a key space for the development of socio-environmental projects, integrating sustainability and integral ecology. This work aims to promote the development of sustainable and integral projects, exemplifying how an academic center can positively impact the community and improve the quality of life of its participants through educational activities. The socio-environmental projects developed at CAPS allow students to apply their theoretical knowledge in real contexts, directly addressing environmental and social issues. Through these experiences, students not only acquire practical skills but also develop critical awareness and a sense of responsibility towards their environment. The relevance of CAPS in student training lies in its ability to foster comprehensive education, preparing students to be agents of change in their communities, capable of facing the challenges of today's world, and promoting the formation of committed individuals who are aware of their role in building a sustainable future.

Keywords: Sustainability, Renewable Energy, Socio-Environmental Projects, Integral Ecology, Environmental Education

Introducción

El desarrollo de proyectos de impacto social repercute significativamente en la formación de estudiantes, debido a que les permite aplicar sus conocimientos teóricos en situaciones reales, enriqueciendo su formación académica y profesional al trabajar en beneficio de la sociedad. Los proyectos de impacto social abarcan múltiples aspectos, entre ellos, podemos incluir los proyectos de vinculación social, y los socioambientales.

Los proyectos de vinculación social abordan problemas locales específicos y fomentan la colaboración con organizaciones gubernamentales, no gubernamentales y empresas. En Cárdenas *et al.* (2025), se presenta un estudio de caso, que describe el desarrollo de un proyecto de vinculación con la sociedad, en el que estudiantes de educación superior se involucraron en el mejoramiento del proceso de producción de dermocosméticos en la comunidad de Madres Conceptas en Cuenca, Ecuador. Este proyecto no solo mejoró los indicadores socioeconómicos de la comunidad, sino que también proporcionó a los estudiantes una valiosa experiencia práctica, donde, a través de la

capacitación y el acondicionamiento de una planta de producción pudieron aplicar sus conocimientos en un entorno real, desarrollando habilidades técnicas y de gestión.

Este estudio de caso es un ejemplo de cómo la colaboración entre la universidad y la comunidad permitió a los estudiantes entender mejor las necesidades de un sector particular de la población, y aplicar sus habilidades para generar un impacto positivo. Esta experiencia fortaleció su compromiso con su carrera y les proporcionó una visión más humanizada de su profesión, promoviendo la formación de individuos críticos con una voluntad transformadora, que contribuyan al desarrollo de una sociedad más equitativa y solidaria.

Los proyectos socioambientales son iniciativas que buscan abordar simultáneamente problemáticas sociales y ambientales, promoviendo la sostenibilidad y el bienestar de las comunidades. Estos proyectos integran aspectos ecológicos, económicos y sociales para generar un impacto positivo y duradero en el entorno y en la calidad de vida de las personas (Temas Ambientales, 2017).

Según la Universidad del Medio Ambiente (2025) los proyectos socioambientales integrales destacan por su enfoque en generar un impacto social positivo a través de la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental. Abordando no solo problemáticas ecológicas, sino también promoviendo el bienestar social, creando un vínculo entre la comunidad y el entorno natural. La importancia de estos proyectos radica en su capacidad para formar estudiantes comprometidos y conscientes, quienes adquieren habilidades prácticas y una visión holística para enfrentar los desafíos ambientales y sociales contemporáneos. Así, los estudiantes se preparan para ser agentes de cambio, capaces de implementar soluciones innovadoras y sostenibles en sus comunidades.

La Universidad La Salle, comprometida con su carisma y su modelo educativo, fomenta el desarrollo de proyectos de impacto social, formando estudiantes comprometidos con la sostenibilidad y la justicia social, preparados para ser agentes de cambio en sus comunidades.

La encíclica *Laudato Si'* del Papa Francisco aborda la Ecología Integral, un concepto que extiende la sostenibilidad para incluir la justicia social, la dignidad humana y el bien común. Su Santidad llama a proteger nuestro "hogar compartido" y a respetar la creación de Dios, elevando el debate sobre sostenibilidad a uno de respeto por la creación divina. La encíclica critica el antropocentrismo y promueve una visión holística y eco-céntrica del mundo, destacando la interdependencia global y la solidaridad. La Ecología Integral se relaciona directamente con el desarrollo de proyectos socioambientales, ya que busca integrar preguntas sobre justicia social en los debates ambientales. El Papa enfatiza la importancia de decisiones tomadas a nivel local (subsidiariedad) y la colaboración global para enfrentar los desafíos ambientales y sociales.

Estos conceptos se materializan en el desarrollo de proyectos socioambientales en El Centro de Apoyo de Proyectos Sustentables (CAPS) de la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ), ubicado en la Unidad Santa Lucía, de la Universidad La Salle México. El cual, impulsa el desarrollo de proyectos con enfoque hacia la sustentabilidad, para mejorar la calidad académica, desarrollar estrategias para la investigación, y transmitir conocimientos a diversos sectores de la comunidad, buscando impactar en la calidad de vida de quienes apliquen los aprendizajes obtenidos.

Actualmente, se desarrolla un proyecto de impacto socioambiental en conjunto con el Centro Comunitario de la Universidad La Salle, que consiste en la impartición de talleres de huerto urbano, jardinería y cultivo de plantas ornamentales, destinado a los trabajadores del Campus Sta. Lucía y a los miembros de la comunidad, como son los niños de escuelas primarias y adultos de la colonia Garcimarrero, de la Alcaldía Álvaro Obregón en la CDMX. El proyecto pretende la mejora de los hábitos de alimentación, producción de alimentos y cuidado de los ecosistemas de los pobladores de la zona para contribuir a la disminución de afectaciones a la salud, así como al posible incremento de sus ingresos.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer los proyectos que se desarrollan en el CAPS de la Universidad La Salle, México; de forma que contribuya al impulso del desarrollo de proyectos sustentables e integrales, que puedan relacionarse con programas académicos y de investigación, encaminados a mejorar la calidad de vida de las comunidades, a través de la aplicación de los conocimientos del estudiantado.

Materiales y Métodos

Los proyectos que se desarrollan en el CAPS están sustentados en la metodología del Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP), y la metodología de gestión del impacto social (GISo). De acuerdo con Cobo González *et al.* (2017) y con Zambrano Briones *et al.* (2022) el ABP es una estrategia didáctica, en donde el docente fomenta en sus estudiantes el desarrollo de proyectos escolares en los que el pilar esencial, es el interés que muestran estos por aprender un tema de la materia que se imparte. Mientras que, de acuerdo con García y Robin (2021), la metodología GISo promueve la gestión de resultados de cambio social basada en el Marco Lógico y la Teoría de cambio, propiciando la visión de transformación social a largo plazo y la acción orientada dar respuesta a las problemáticas socioambientales del territorio.

Ambas metodologías fomentan el aprendizaje activo centrado en los alumnos y en la comunidad y su entorno; a su vez permiten la socialización del conocimiento y la implementación de una evaluación formativa y enfocada a resultados de cambio social.

A continuación, se describen las metodologías implementadas para el desarrollo de los proyectos del CAPS. El primer paso consiste en realizar un diagnóstico para identificar la problemática y las necesidades de la comunidad a atender, mediante observaciones y aplicación de entrevistas personales y de grupos focales. Esto permite definir los objetivos de aprendizaje de los estudiantes y la ruta de cambio social (Figura 1), buscar la información para documentar las propuestas de trabajo por medio de talleres y proyectos en campo, y establecer un plan de acción y de monitoreo y evaluación simultáneos, que responden a las necesidades identificadas en los estudiantes y en el contexto comunitario.

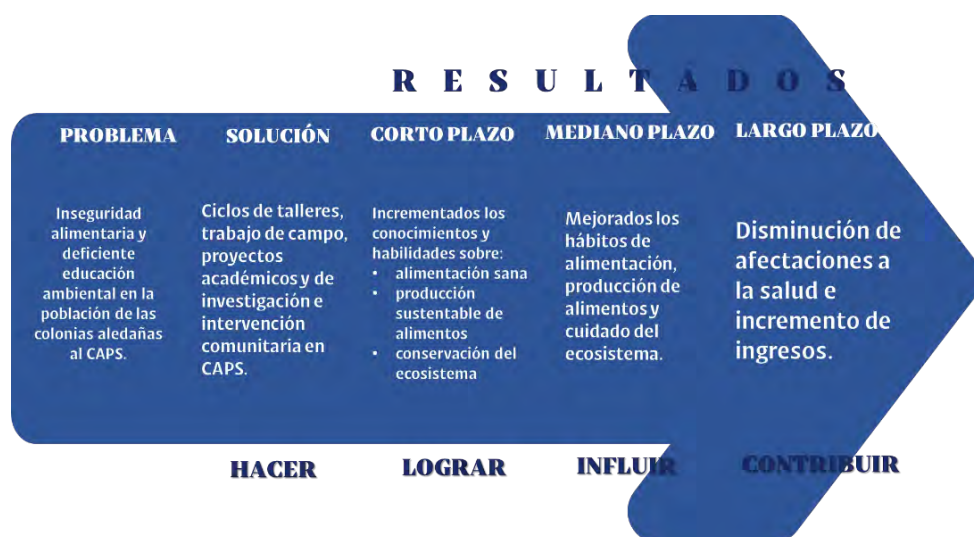


Figura 1. Ruta de cambio social del CAPS

La siguiente etapa corresponde a la ejecución de las actividades propuestas. Las cuales, una vez implementadas, se les da seguimiento posterior, que involucra una evaluación que permita ver si se alcanzaron los aprendizajes esperados en los estudiantes y los resultados de corto plazo en la comunidad social, que son la base de la cadena de cambios a mediano y largo plazo. Finalmente, se realiza una retroalimentación, basada en el monitoreo de los datos cuantitativos y cualitativos recabados y construcción de aprendizajes que llevan a un plan de mejora. Los pasos descritos se esquematizan en la Figura 2.

En el caso particular de los proyectos que se han desarrollado en el CAPS, se han realizado las siguientes acciones:

- Involucrar a los alumnos en el manejo de cultivos con un enfoque integral.
- Realizar actividades de docencia, en laboratorio y trabajo de campo.
- Desarrollar proyectos vinculados a las asignaturas de los programas académicos.
- Realizar actividades de Servicio social, Programas de formación, Proyectos de tesis y Voluntariado.

- e) Coordinar talleres y cursos de capacitación, referentes a proyectos desarrollados en el área; involucrando a la comunidad.
- f) Coordinar con docentes e investigadores de la universidad proyectos que puedan desarrollarse en el área de invernaderos.

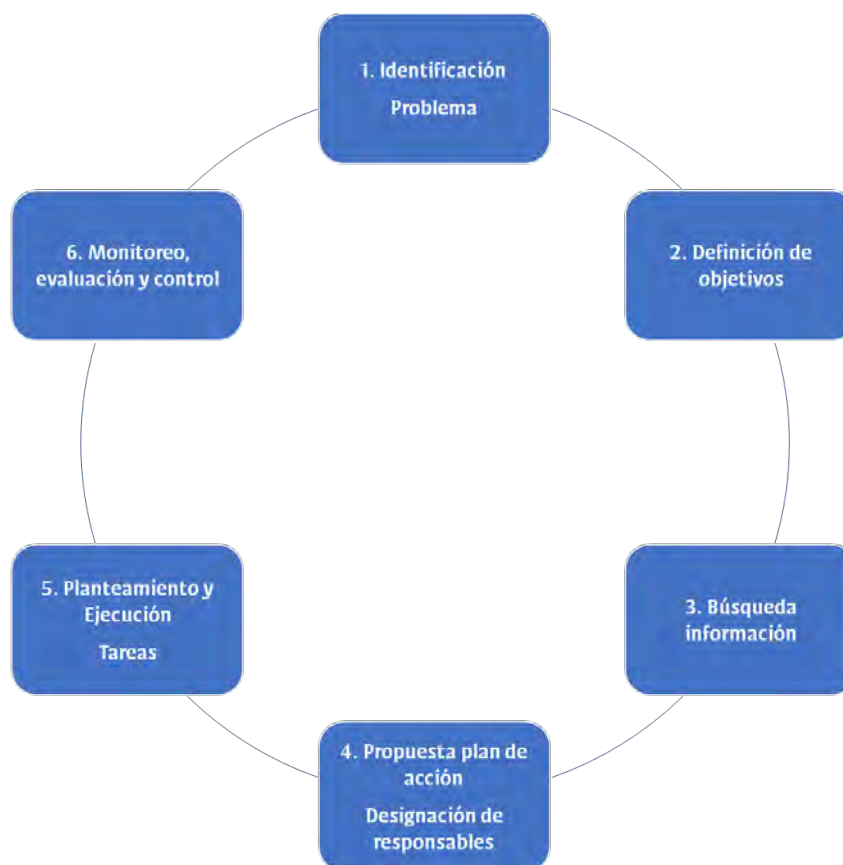


Figura 2. Propuesta metodológica desarrollada a partir del ABP

Resultados y Discusión

Los proyectos de impacto social que se han ido ejecutando en nuestro centro nos han permitido alcanzar a corto y mediano plazo los siguientes resultados:

- Incremento de los conocimientos y habilidades sobre alimentación sana, producción sustentable de alimentos y conservación de los ecosistemas, y junto a esto, la mejora en la ejecución de estas prácticas en las comunidades aledañas a nuestro centro. Y, lo que, es más, como consecuencia de ello, la disminución de afectaciones a la salud y el incremento de ingresos.
- Cultivos de especies vegetales comestibles sin el uso de fertilización química tomando en cuenta las condiciones nutricionales de los suelos, hídricas y lumínicas de la zona y áreas colindantes del campus Santa Lucía.
- Reciclaje de residuos agrícolas y domésticos como medio para generar fertilizantes orgánicos mediante el método de composteo, garantizándose de este modo, el óptimo crecimiento y producción de cultivos de especies vegetales alimenticias, medicinales y ornamentales.
- Siembra de diversas especies arbóreas para la producción de frutos comestibles.
- Fortalecimiento del desarrollo de actitudes, valores y habilidades en los estudiantes de las diversas carreras de la universidad La Salle para relacionarse y convivir con otros al formar grupos de trabajo a través de la ejecución de diversas labores en el huerto del CAPS de Campus Santa Lucía.
- Conviene subrayar que nuestro centro representa un área de oportunidades para el desarrollo del trabajo en equipo permitiendo a los jóvenes, vecino de las comunidades cercanas y colaboradores la aplicación de los

conceptos de sociabilidad, cooperación y responsabilidad. Asimismo, les permite estar en contacto directo con la naturaleza y sus procesos bioquímicos, a través del trabajo con la tierra, la observación de la fauna silvestre, la transformación de los residuos orgánicos en tierra fértil, así como contribuir a su formación social.

- Junto a esto, la valoración más destacada de los participantes en nuestras actividades se centra en la relevancia de los temas tratados, así como la adquisición de nuevos saberes y su aplicación en las actividades cotidianas, la combinación de aprendizajes y disfrute de los eventos; el impacto positivo para el cambio de actitud hacia el cuidado del medio ambiente y el deseo de compartir dicha información.

En la Tabla 1 se muestran los principales resultados alcanzados, en relación con el incremento de conocimientos y prácticas que contribuyen a la calidad de vida y una sociedad más sostenible en el CAPS Sta. Lucía de la Universidad La Salle, CDMX.

Tabla 1 Participación en las acciones de transformación comunitaria generadas en el CAPS de la Universidad La Salle México.

Acciones de transformación comunitaria	Personal involucrado
12 actividades de docencia y trabajo de campo	107 estudiantes
14 proyectos vinculados a las asignaturas de los programas de estudio de las licenciaturas	
Servicio Social	
Programa de formación socioambiental	5 prestadores de servicio social
Talleres comunitarios del Día de la tierra y Huerto en casa	10 estudiantes acreditados
	60 personas de la comunidad

Para poder asegurar el cumplimiento de objetivos planteados, se requiere sistematizar la medición de resultados. A su vez, la búsqueda de financiamiento, adicional al provisto por la universidad, es esencial para fortalecer la operación y gestión del CAPS, asegurando su sostenibilidad y el impacto positivo en la comunidad.

Conclusiones

El Centro de Apoyo a los Proyectos Sustentables (CAPS) de la Universidad La Salle México emplea el Aprendizaje Basado en Proyectos como estrategia didáctica, promoviendo el trabajo multidisciplinario, integrando la docencia y la investigación con un enfoque de aprendizaje-servicio. A través de la articulación del saber con experiencias in situ, los proyectos académicos, de investigación y sociales generan un impacto positivo en las comunidades de Santa Lucía.

Las principales problemáticas que se busca resolver incluyen la inseguridad alimentaria, la deficiente educación ambiental, y las afectaciones a los ecosistemas de la zona. Para abordar estos desafíos, el CAPS implementa prácticas agroecológicas, fomenta humedales artificiales con especies nativas, y capacita a la comunidad en el cultivo de plantas ornamentales y medicinales. Estas acciones no solo mejoran la calidad de vida de los participantes, sino que también promueven la conservación del entorno y el desarrollo de actividades de emprendimiento.

El CAPS, a través de la vinculación de sus programas socioambientales con el Centro Comunitario Santa Lucía, contribuye a la formación de líderes y agentes de cambio social comprometidos con el bien común y el cuidado de la Casa Común.

Agradecimientos y financiamiento: Agradecemos a la Universidad La Salle México a través de la Facultad de Ciencias Químicas por el apoyo en el financiamiento de los proyectos desarrollados en el CAPS; a los estudiantes y a todos los colaboradores del CAPS por su apoyo y dedicación.

Bibliografía

- Aledo, A., & Aznar-Crespo, P. (2021). Evaluación de impacto social: Una propuesta metodológica orientada a la gestión proactiva de proyectos. *OBETS. Revista de Ciencias Sociales*, 16(2), 245–262. <https://doi.org/10.14198/OBETS2021.16.2.02>
- ASUNTO, P. S. U. (2017). *El Papa Francisco, Laudato Si', y la ecología integral*.

- Cárdenas, M. M., Cevallos, I. M., & Castillo, M. C. (2025). El proyecto como ente transformador del entorno social: Un caso de estudio. En VI Congreso de Educación Salesiana. <https://doi.org/10.17163/abyaups.114.921>
- Cobo Gonzales, G., & Valdivia Cañotte, S. M. (2017). *Aprendizaje basado en proyectos*. Colección Materiales de Apoyo a la Docencia #1, Pontificia Universidad Católica del Perú, Instituto de Docencia Universitaria. ISBN 978-612-47489-4-3
- Coronado-López. (2023). *Una visión sistémica de los proyectos socioambientales para la conservación de especies en México*. Recuperado el 21 de mayo de 2025 de <https://umamexico.com/proyectos-socioambientales-integrales/>
- Escobar, L. F. *Centro de Atención a Proyectos Sustentables, Coordinación de Hidroponía, Universidad La Salle*.
- García, B., & Robin, S. (2021). Enfoques, metodologías y herramientas del ecosistema de la medición y gestión del impacto social en España. *Revista de Contabilidad y Dirección*, 32, 27–50.
- Zambrano Briones, M. A., Hernández Díaz, A., & Mendoza Bravo, K. L. (2022). El aprendizaje basado en proyectos como estrategia didáctica. *Conrado*, 18(84), 172–182.

Determinación por FTIR de los componentes bromatológicos de *Lolium perenne* bajo esquemas de fertilización y corte en invierno y primavera

José Agustín Pacheco-Ortiz ^{1,*}, Rigoberto Castro-Rivera ¹, Gisela Aguilar-Benítez ², Brenda Yanin Azcárraga-Salinas ¹, Andres Castro-Sierra ¹, Javier Ruiz-Romero ¹

¹ Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Instituto Politécnico Nacional, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México

² Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

* Autor de correspondencia: jpachecoo1902@alumno.ipn.mx

Desarrollo Sustentable (Agricultura sustentable)

Recibido: 12 de junio de 2025 Aceptado: 13 de julio de 2025 Publicado: 23 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.499>

Resumen: La composición de la pared celular en forrajes como *Lolium perenne* es determinante en su calidad nutricional, y está relacionada con la digestibilidad de la biomasa. No obstante, son escasos los estudios que analizan el efecto de la estacionalidad, la fertilización y la frecuencia de corte sobre estos componentes desde un enfoque sustentable. Este estudio se realizó en condiciones de invernadero durante invierno y primavera, utilizando un diseño en bloques completamente al azar. Se evaluaron cuatro tratamientos: Control (C), Fertilización Orgánica (FO), Mezcla orgánico-mineral (M) y Fertilización Mineral (FM), con cortes a las 4, 6 y 12 semanas. Las muestras foliares se analizaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para cuantificar celulosa, hemicelulosa y lignina. En invierno, FM registró 21% de lignina a las 4 semanas, mientras que la celulosa fue mayor en C (75%) a las 12 semanas. En primavera, la celulosa alcanzó 76% en FM a las 4 semanas, y la lignina se mantuvo baja (15–17%). La hemicelulosa osciló entre 9 y 12% en ambas estaciones. FTIR demostró ser una herramienta rápida y no destructiva para este análisis. Se concluye que estación, fertilización y corte influyen en la composición de la pared celular, con implicaciones para el manejo forrajero sustentable.

Palabras clave: *Lolium perenne*, Fertilización sustentable, Frecuencia de corte, Pared celular vegetal, FTIR

Determination of the FTIR-Based determination of the bromatological components of *Lolium perenne* under fertilization and harvest schemes during winter and spring

Abstract: The composition of the cell wall in forages such as *Lolium perenne* is a key factor in their nutritional quality and is closely related to biomass digestibility. However, few studies have analyzed the effects of seasonality, fertilization, and harvest frequency on these components from a sustainability-focused perspective. This study was conducted under greenhouse conditions during winter and spring, using a completely randomized block design. Four treatments were evaluated: Control (C), Organic Fertilization (FO), Organic-Mineral Mix (M), and Mineral Fertilization (FM), with harvest intervals at 4, 6, and 12 weeks. Leaf samples were analyzed using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) to quantify cellulose, hemicellulose, and lignin. In winter, FM recorded 21% lignin at 4 weeks, while cellulose was highest in C (75%) at 12 weeks. In spring, cellulose reached 76% in FM at 4 weeks, and lignin remained low (15–17%). Hemicellulose ranged from 9 to 12% in both seasons. FTIR proved to be a fast and non-destructive tool for this analysis. It is concluded that season, fertilization, and harvest frequency influence cell wall composition, with implications for sustainable forage management.

Keywords: *Lolium perenne*, Sustainable fertilization, Harvest frequency, Plant cell wall, FTIR

Introducción

La creciente demanda de forrajes de alta calidad nutricional en sistemas ganaderos sustentables ha incrementado el interés por evaluar el impacto de las prácticas agronómicas sobre los componentes estructurales de los cultivos forrajeros. En particular, la composición de la pared celular vegetal es un factor clave que influye directamente en la digestibilidad y el valor alimenticio del forraje, ya que determina la disponibilidad de energía para los rumiantes (Castro-Hernández *et al.*, 2017). La celulosa, hemicelulosa y lignina conforman los principales constituyentes de dicha estructura, y su proporción está sujeta a variaciones estacionales, de manejo y fertilización (Cosgrove, 2018; Byrt *et al.*, 2011). *Lolium perenne* L. es una gramínea perenne de uso extensivo en regiones templadas debido a su rápida recuperación tras el corte con un elevado rendimiento que puede llegar a superar las 10-12 toneladas por hectárea de materia seca. No obstante, su composición química fluctúa en función de la estación del año y la frecuencia de aprovechamiento (Wróbel *et al.*, 2022), lo cual puede afectar la eficiencia del sistema productivo si no se considera

dentro del manejo técnico. Además, el uso exclusivo de fertilizantes químicos ha sido asociado a efectos negativos en la calidad del suelo a largo plazo, lo que ha motivado la búsqueda de estrategias integradas que incluyan fuentes orgánicas, en línea con los principios de la agricultura sustentable (Pacheco-Ortiz *et al.*, 2021).

La espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) ha emergido como una alternativa no destructiva y rápida para analizar la composición de materiales vegetales, permitiendo detectar compuestos estructurales mediante sus señales moleculares características (Casassa-Padrón *et al.*, 2022; Javier-Astete *et al.*, 2021). Aunque su uso ha sido más común en especies leñosas o granos, investigaciones recientes han demostrado su aplicabilidad en forrajes para identificar bandas espectrales específicas de celulosa, hemicelulosa y lignina (Javier-Astete *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2016).

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de distintas estrategias de fertilización (orgánica, mineral y combinada) y frecuencias de corte sobre la composición de la pared celular en *Lolium perenne*, durante las estaciones de invierno y primavera, mediante el uso de FTIR. Esta investigación aporta evidencia sobre la influencia de las prácticas de manejo sobre la calidad estructural del forraje, bajo condiciones climáticas contrastantes, contribuyendo al diseño de esquemas productivos más eficientes y sustentables. Los resultados obtenidos muestran variaciones significativas en la proporción relativa de celulosa, hemicelulosa y lignina entre estaciones, frecuencias de corte y tratamientos de fertilización, lo que permite proponer ajustes agronómicos en función de la época del año para mejorar la calidad bromatológica del forraje.

Materiales y Métodos

El presente estudio se realizó en condiciones controladas dentro de un invernadero tipo túnel, utilizando macetas con capacidad de 3 kg llenadas con suelo recolectado del Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional (Tlaxcala, México; coordenadas: 19°16'50" N, 98°21'58" O). El experimento se desarrolló durante las estaciones de invierno y primavera. Se empleó un diseño experimental de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento, con el objetivo de evaluar el efecto de la fertilización combinada y la frecuencia de corte sobre la composición de la pared celular de *Lolium perenne* (Pacheco-Ortiz *et al.*, 2021).

Se establecieron cuatro tratamientos de fertilización: Fertilizante Orgánico (FO) aplicación de lixiviado orgánico (dilución al 25%) proporcionado por GreenForest, Mezcla (M) combinación de lixiviado (25%) con urea (50 kg/ha), Fertilización Mineral (FM) aplicación de urea (50 kg/ha), y Control (C) un tratamiento sin fertilizante se empleó solo agua. Las frecuencias de corte consideradas fueron de 4, 6 y 12 semanas, lo que permitió estudiar la dinámica estacional del crecimiento forrajero bajo diferentes estrategias de manejo agronómico. Las hojas recolectadas en cada tratamiento fueron secadas en una estufa modelo H-102 (RIOSSA) a 70 °C durante 24 horas hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, se conservaron en un desecador por una hora para evitar la reabsorción de humedad ambiental dado por la modificación a la metodología propuesta por (Pacheco-Ortiz *et al.*, 2021).

El análisis de la composición de la pared celular se realizó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), utilizando un espectrómetro Bruker VERTEX 70 con accesorio de reflectancia total atenuada (ATR, PIKE MIRacle), que permite análisis directo del material sin necesidad de tratamientos previos extensivos. Las mediciones espectrales se efectuaron en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} . Para minimizar el ruido ambiental, se adquirieron 60 espectros de fondo previos al análisis de las muestras, las cuales fueron sometidas a 120 escaneos consecutivos para obtener un espectro representativo del material forrajero (Javier-Astete *et al.*, 2021). La identificación de los componentes estructurales de la pared celular se basó en la localización de bandas infrarrojas específicas: la celulosa fue detectada en el intervalo de 1350–890 cm^{-1} , con un pico prominente en 1031 cm^{-1} correspondiente a los enlaces C–O y C–C del esqueleto de β -D-glucosa; la hemicelulosa mostró una señal característica en 1730 cm^{-1} , atribuida a los grupos carbonilo (C=O); y la lignina presentó señales entre 1580 y 1380 cm^{-1} , destacando un pico en 1375 cm^{-1} relacionado con vibraciones C–H y C–C en anillos aromáticos fenólicos (Casassa-Padrón *et al.*, 2022; Javier-Astete *et al.*, 2021).

Para asegurar la precisión y repetibilidad de los resultados, se realizaron tres mediciones por muestra, evaluando dos regiones por hoja (zona apical y basal) en tres hojas diferentes por tratamiento. Los datos espectrales obtenidos fueron procesados utilizando el software OriginPro 2024 para análisis descriptivo, comparando los efectos de la estación

(invierno y primavera), los niveles de corte (4, 6 y 12 semanas) y los tratamientos de fertilización aplicados. Los gráficos representativos se generaron con Microsoft Excel para Microsoft 365 MSO (Pacheco-Ortiz *et al.*, 2021).

Resultados y Discusión

Los análisis realizados mediante espectroscopía FTIR revelaron diferencias marcadas en la composición de la pared celular de *Lolium perenne* en función de la estación del año, el tipo de fertilización y la frecuencia de corte. Estos resultados reflejan la plasticidad de la especie ante condiciones ambientales contrastantes y prácticas de manejo agronómico diferenciadas.

Durante el invierno, se observó que FM promovió una mayor acumulación de lignina en etapas tempranas. A las 4 semanas, FM alcanzó 21% de lignina, mientras que C, FO y M se mantuvieron en 17%. Este incremento podría reflejar una respuesta adaptativa, favoreciendo la lignificación como mecanismo de protección estructural (Vanholme *et al.*, 2019). La celulosa presentó sus valores más altos 72% en C, FO y M, mientras que FM disminuyó a 68%. La hemicelulosa se mantuvo estable ~12% en todos los tratamientos. A las 6 semanas, la lignina disminuyó levemente, manteniéndose en 18% en C, FO y FM, y aumentando ligeramente a 20% en M. La celulosa se incrementó en C y FM en 74%, y fue ligeramente menor en FO en 72% y M en 70%. La hemicelulosa se estabilizó en 10% en todos los casos, sin diferencias relevantes. En el corte de 12 semanas, FO, M y FM mantuvieron la lignina en 19%, mientras que C descendió a 15%. En contraste, la celulosa alcanzó su valor máximo en C en 75%, superando a los demás tratamientos, que se mantuvieron en 71%. La hemicelulosa continuó estable en 10% en todos los tratamientos, ver Figura 1.

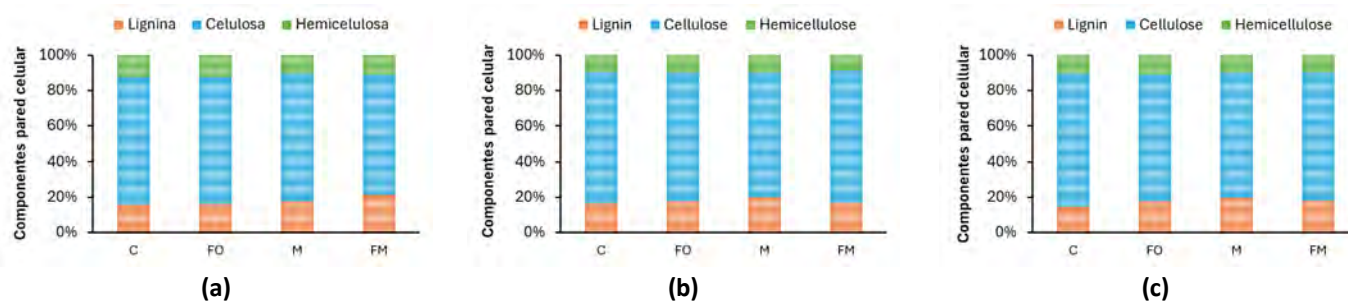


Figura 1. Composición bromatológica de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y lignina) en la estación invierno: (a) corte 4 semanas, (b) corte 6 semanas y (c) corte 12 semanas.

En primavera, se observó una tendencia opuesta a la de invierno en los primeros cortes. A las 4 semanas, los contenidos de lignina fueron menores: 17% en C, 16% en FO y M, y 15% en FM. La celulosa, en cambio, alcanzó su máximo en FM en 76%, seguida de FO y M en 75% y C en 74%. La hemicelulosa se mantuvo en 10% en todos los tratamientos, salvo en FO, donde disminuyó a 9%. A las 6 semanas, FM presentó el valor más alto de lignina en 19%, mientras que los demás tratamientos se mantuvieron en 17%. La celulosa fue mayor en FO y M en 75%, y menor en FM y C en 72%. La hemicelulosa se mantuvo en ~10%. En el corte de 12 semanas, FO mostró el mayor contenido de lignina en 19%, seguido de M y FM en 18% y C en 17%. La celulosa fue más alta en C en 73% y descendió ligeramente en FO y M en 70%, y en FM en 71%. La hemicelulosa alcanzó su máximo en M en 12% y se mantuvo en 11% en los demás tratamientos, ver Figura 2.

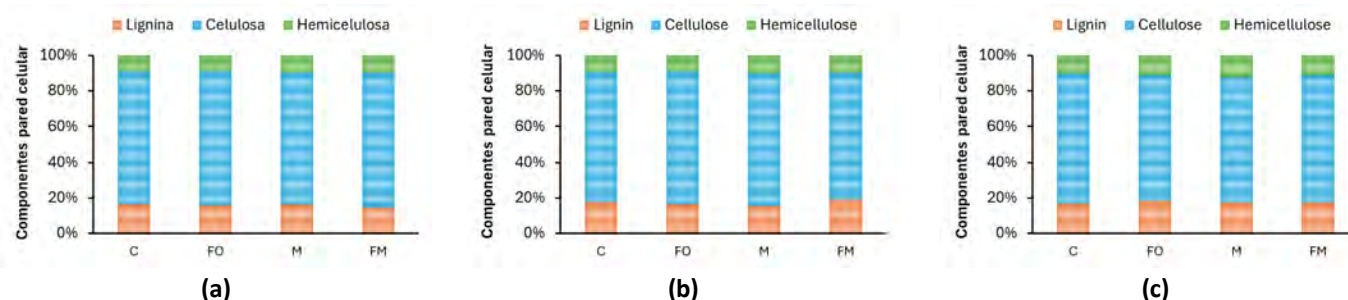


Figura 2. Composición bromatológica de la pared celular (celulosa, hemicelulosa y lignina) en la estación primavera: (a) corte 4 semanas, (b) corte 6 semanas y (c) corte 12 semanas.

Comparando ambas estaciones, los niveles de lignina fueron similares en cortes de 4 y 6 semanas en 17%, pero aumentaron a 18–19% en los cortes de 12 semanas en FO, M y FM. La celulosa fue más alta en FM durante invierno en 75% a las 6 semanas y primavera en 76% a las 4 semanas. C y FO se mantuvieron consistentes en 74% en ambas estaciones, mientras que M presentó reducciones notables alcanzando valores de alrededor del 70% en invierno y primavera. La hemicelulosa mostró poca variabilidad en 9–12%, siendo más estable que los otros componentes (Pauly *et al.*, 2019). Se incrementó ligeramente en primavera, alcanzando su valor máximo en M en 12%, lo cual podría estar relacionado con un equilibrio estructural frente a cambios estacionales. Estos resultados concuerdan con trabajos de Hernández-Álvarez *et al.*, (2024) que señalan que la lignina se incrementa con la madurez del forraje, Undersander y Sharpe (2025) señaló mientras que la celulosa es más abundante en fases activas de crecimiento. Además, el tipo de fertilización influye en la dinámica de crecimiento y en la composición bromatológica del tejido vegetal.

Conclusiones

El presente estudio evidenció que la composición de la pared celular de *Lolium perenne* se ve influenciada por la estación del año, la frecuencia de corte y el tipo de fertilización aplicada. En invierno, los tratamientos con fertilización mineral (FM) presentaron los mayores contenidos de lignina, especialmente en etapas tempranas del desarrollo. En contraste, durante la primavera, se observó un incremento en el contenido de celulosa, alcanzando su valor máximo en FM a las 4 semanas de corte, mientras que la lignina se mantuvo en niveles más bajos. La hemicelulosa mostró una variabilidad mínima entre tratamientos y estaciones, oscilando entre 9 y 12%. Estos resultados confirman que el manejo agronómico influye directamente en la calidad estructural del forraje. Además, la espectroscopía FTIR se consolidó como una herramienta eficaz y sustentable para el análisis no destructivo de los componentes de la pared celular, permitiendo generar información valiosa para optimizar el manejo forrajero bajo criterios de sostenibilidad.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) de la Ciudad de México por el apoyo otorgado mediante la beca para estudios de posgrado con CVU 1012255. Asimismo, al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado por el proyecto SIP 20250022 “Rendimiento de gramíneas a diferentes estrategias de defoliación y fertilización orgánico-mineral”, al cual se reconoce por el respaldo académico.

Bibliografía

- Byrt, C. S., Grof, C. P., & Furbank, R. T. (2011). C4 plants as biofuel feedstocks: Optimising biomass production and feedstock quality from a lignocellulosic perspective. *Journal of Integrative Plant Biology*, 53(2), 120–13. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.01023.x>
- Casassa-Padrón, A., Portillo, E., & González, C. (2022). FTIR-ATR for the identification of *Psidium guajava* plants infested with *Meloidogyne enterolobii*. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 39(3), e223937. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/38555>
- Castro-Hernández, H., Domínguez-Vara, I. A., Morales-Almaráz, E., & Huerta-Bravo, M. (2017). Composición química, contenido mineral y digestibilidad in vitro de raigrás (*Lolium perenne*) según intervalo de corte y época de crecimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(2), 201–210. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v8i2.4445>
- Cosgrove, D. J. (2018). Diffuse growth of plant cell walls. *Plant Physiology*, 176(1), 16–27. <https://doi.org/10.1104/pp.17.01541>
- Hernández-Álvarez, U. M., López-Colomba, E., Bollati, G. P., Carloni, E. J., Reutemann, A. G., & Grunberg, K. A. (2024). Effects of leaf and stem maturation on nutritional value in *Megathyrus maximus*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(5), 2937–2946. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13186>
- Javier-Astete, R., Jimenez-Davalos, J., & Zolla, G. (2021). Determination of hemicellulose, cellulose, holocellulose and lignin content using FTIR in *Calycophyllum spruceanum* (Benth.) K. Schum. and *Guazuma crinita* Lam. *PLOS ONE*, 16(10), e0256559. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256559>
- Li, M., Pu, Y., & Ragauskas, A. J. (2016). Current understanding of the correlation of lignin structure with biomass recalcitrance. *Frontiers in Chemistry*, 4(45), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fchem.2016.00045>
- Pacheco-Ortiz, J. A., Castro-Rivera, R., Solís-Oba, M. M., Juárez-Rangel, A. P., & Romero-Rodríguez, A. (2021). Evaluación de la fertilización orgánica y frecuencias de corte en el rendimiento de ballico perenne. *Mexicana de Agroecosistemas*, 8(1), 100–108. <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/189>
- Pauly, M., Gille, S., & Liu, L. (2019). Hemicellulose biosynthesis. *Planta*, 250(2), 395–412. <https://doi.org/10.1007/s00425-013-1921-1>
- Undersander, D. J., & Sharpe, P. (2025). Chapter 1 – Forage plant structure, function, nutrition and growth. En P. H. Sharpe (Ed.), *Horse Pasture Management* (2.ª ed., pp. 1–10). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95084-8.00013-6>
- Vanholme, R., De Meester, B., Ralph, J., & Boerjan, W. (2019). Lignin biosynthesis and its integration into metabolism. *Current Opinion in Biotechnology*, 56, 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.02.018>
- Wróbel, B., Zielewicz, W., Paszkiewicz-Jasińska, A., Spychalski, B., & Jakubowska, Z. (2022). Effect of harvest date on structural carbohydrates and lignin content in meadow sward in different pluvio-thermal conditions. *Journal of Water and Land Development*, 55, 60–66. <https://www.jwld.pl/files/2022-04-JWLD-07.pdf>

Análisis de reactores nucleares de nueva generación para una transición energética más limpia en México

Deyanira Silvestre-Castañeda y Mariana Hernández-Escalante *

Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860, Tolcayuca, Hidalgo, México

* Autor de correspondencia: mkhernandez@upmh.edu.mx; Tel.: +52 5569711636

Energías Renovables (Energía nuclear)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 23 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.524>

Resumen: La transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible representa un desafío crucial para México, especialmente en el contexto de sus crecientes demandas eléctricas, los compromisos internacionales adquiridos en materia del cambio climático y el continuo uso de recursos fósiles. En este trabajo se analizan reactores nucleares de nueva generación como opción para una transición energética que ayude a la diversificación y descarbonización del sector. Se eligieron reactores nucleares de III, III+ y IV generación donde se analizaron de forma documental sus factores técnicos, tipo de combustible, moderador, mejoras en eficiencia y seguridad con respecto a las generaciones anteriores, con el objetivo de evaluar su implementación en México. A partir de un análisis de toma de decisión se verifican que reactores podrían tener mayor oportunidad de éxito en el país. Los resultados sugieren que los reactores nucleares de nueva generación como el MSFR y AP1000, podrían jugar un papel estratégico en la seguridad energética, además de contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sin comprometer la estabilidad del Sistema Eléctrico Nacional.

Palabras clave: reactores nucleares, energía, transición energética, descarbonización, toma de decisiones

Analysis of Next-Generation Nuclear Reactors for a Cleaner Energy Transition in Mexico

Abstract: The transition toward a cleaner and more sustainable energy system represents a critical challenge for Mexico, particularly in the context of increasing electricity demand, international commitments on climate change, and the continued reliance on fossil fuels. This study analyzes next-generation nuclear reactors as a potential option for an energy transition that supports the diversification and decarbonization of the sector. Generation III, III+, and IV nuclear reactors were selected, and a documentary analysis was conducted to assess their technical features, fuel type, moderator, and improvements in efficiency and safety compared to previous generations, with the aim of evaluating their implementation in Mexico. Additionally, the study includes a review of the international energy commitments undertaken by the country to identify opportunities for integrating nuclear energy into the national energy matrix. Based on a decision-making analysis, it is determined which reactors could have the greatest chance of success in the country. The results suggest that next-generation nuclear reactors such as MSFR and AP100 could play a strategic role in ensuring energy security and significantly contribute to reducing greenhouse gas emissions without compromising the stability of the National Electric System.

Keywords: nuclear reactor, energy, energy transition, decarbonization, decision-making

Introducción

El futuro del planeta demanda el uso racional y sostenible de todos los recursos energéticos disponibles en la actualidad (SENER, 2024). Esta necesidad supone un reto para una industria que le ha confiado la matriz energética a procesos que dependen de combustibles fósiles. La matriz energética mexicana sigue estando dominada por estas fuentes, lo que contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, la forma más lógica de reducir la dependencia de los combustibles fósiles es iniciando un plan de acción que restrinja su uso excesivo en los sistemas productivos (Cordera Campos & Provencio Durazo, 2018). Esta transición energética no puede ser introducida de forma precipitada ya que esto puede traer consigo consecuencias económicas perjudiciales (Torres Flores, 2020).

En este contexto, la energía nuclear es una fuente ampliamente utilizada en la industria eléctrica para la generación de electricidad, destacándose por su capacidad de producción a gran escala, es por este motivo que la manera menos disruptiva y lógica de iniciar una transición energética sería aumentar el uso de plantas nucleares para satisfacer el suministro eléctrico (Brook *et al.*, 2014).

Lo que hace tan especial a la energía nuclear comparado con el resto de las tecnologías es la capacidad energética de los reactores nucleares, ya que comparada con otras tecnologías tienden a aportar energía base. Esta capacidad depende de su combustible, siendo el uranio la principal fuente utilizada. Este elemento radiactivo, al igual que otros actínidos, libera energía durante su proceso de decaimiento. Su alta densidad energética permite que una cantidad de combustible del tamaño de un huevo de gallina genere la misma electricidad que 88 toneladas de carbón (Tarakanov, 2023).

El uranio es uno de los elementos químicos más abundantes en la corteza terrestre, siendo así que las reservas razonablemente aseguradas de este elemento ascienden a 3.17 millones de toneladas (Internationale Atomenergie-Organisation, 2005). Existen tres isótopos naturales del uranio: el uranio 234 (U-234), el uranio 235 (U-235) y el uranio 238 (U-238). El U-235 representa tan solo el 0.72% del uranio en su estado natural y para poder fabricar combustible nuclear es necesario aumentar artificialmente la concentración de U-235 mediante un procedimiento llamado “enriquecimiento”. La mayoría de los reactores comerciales emplean como combustible uranio con una proporción de U-235 menor al 5%, este tipo de uranio es denominado “uranio poco enriquecido” (UPE) y tiene como característica que no se degrada y se puede almacenar de forma segura durante muchos años (IAEA, 2016).

Para poder tomar una decisión en cuanto al tipo de reactor que se puede implementar debemos tomar en cuenta el factor principal que define el tipo de reactor: la combinación combustible-moderador (Murakami, 2021). El reactor de agua ligera (LWR, por sus siglas en inglés) es el tipo de reactor nuclear más común en el mundo. Utiliza óxido de uranio, o una mezcla de uranio y plutonio, como combustible, y agua común como moderador. No obstante, la combinación de diferentes tipos de combustibles y moderadores ha dado lugar al desarrollo de una variedad de reactores con distintas características (Lamarsh & Baratta, 2001).

El diseño de reactores nucleares usualmente es categorizado por “generaciones”. Bajo este argumento las generaciones en las que se clasifican son: I, II, III, III+ y IV, cuyos atributos característicos residen en las diferencias entre las distintas generaciones de reactores (Goldberg & Rosner, s. f.).

La generación I es la generación de los prototipos iniciales, diseños desarrollados originalmente para uso naval a finales de la década de los 40's (Khalil *et al.*, s. f.). Fueron el desarrollo de estos proyectos militares los que tuvieron importantes implicaciones en la generación de energía eléctrica puesto que utilizaban Reactores de Agua Presurizada (PWR), mismos que se han convertido en los reactores más utilizados a nivel mundial para la generación de electricidad (Chater, s. f.).

La generación II es la generación de los reactores comerciales, diseñados para ser económicos y confiables, durante el desarrollo de esta generación emergieron reactores como: Reactores de Agua Ligera (LWR), Reactores de Agua Presurizada (PWR), Reactores de Agua en Ebullición (BWR), Canadian Deuterium Uranium (CANDU), Reactores de energía Agua-Agua VVER/RBMK. Estos sistemas comprenden la mayor parte de los más de 400 reactores comerciales en la actualidad (Goldberg & Rosner, s.f.).

Los reactores nucleares de Gen. III y III+ fueron desarrollados recientemente en la década de los 90's (Marques, 2010), este tipo de reactores son esencialmente reactores de generación II con mejoras de diseño evolutivas que ofrecen avances significativos en materia de seguridad y economía (Khalil *et al.*, s.f.).

Por último, los reactores de Gen IV están diseñados para operar a temperaturas más altas que las de los reactores que se encuentran actualmente en operación, lo que los hará jugar un papel importante en procesos no eléctricos (Kiegiel *et al.*, 2025).

Probablemente pueden existir preguntas sobre las características técnicas y de operación de las primeras dos generaciones de reactores, sin embargo, en este trabajo le daremos prioridad al análisis de generaciones más nuevas de reactores nucleares como lo son la generación III, III+ y IV debido a que tienen mayor probabilidad de ser incorporados en la actualidad a una matriz energética, por sus avances tecnológicos.

Este trabajo se estructura en torno a una revisión organizada de los reactores que constituyen a las generaciones III, III+ y IV, seguida de una revisión de viabilidad técnica y operativa con la finalidad de proponer la opción más adecuada para diversificar la matriz energética nacional mediante un análisis de toma de decisiones por ponderación.

Desarrollo

A lo largo de este trabajo se llevó a cabo un análisis técnico de reactores nucleares de generación III, III+ y IV con la finalidad de analizar su potencial de implementación en el contexto energético mexicano, basada en una metodología por ponderación de análisis de toma de decisiones.

Para llevar a cabo esta investigación se realizó una investigación bibliográfica extensiva, un repositorio donde se agrupó toda la información de la caracterización de los reactores nucleares, y por último se llevó a cabo una metodología de análisis de toma de decisión por ponderación para visualizar qué reactores tienen la mejor calificación.

En la revisión de bibliografía inicial se realizó una búsqueda de información técnica en artículos académicos, bases de datos de organismos internacionales y reportes técnicos, permitiéndonos establecer un marco general sobre los tipos de reactores, sus características, ventajas y aplicaciones energéticas. De esta revisión bibliográfica se obtuvo lo siguiente:

Energía nuclear en México

A nivel nacional en materia de generación de energía nuclear, México cuenta con la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde en Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, Veracruz (SENER, 2021) con dos reactores de tipo BWR en operación desde 1984 y 1994 respectivamente (IAEA, s. f.-b). Esta central nucleoeleéctrica posee una capacidad neta de 1552 MW que representan el 4.5% de la electricidad que consume el país, el 8.9% de la generación de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y constituye el 18% de la energía limpia generada por el país (CFE, 2022).

Laguna Verde opera con altos estándares de seguridad y calidad y es evaluada por la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO) *Por sus siglas en inglés: World Association of Nuclear Operators*, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el Instituto de Operaciones de Energía Nuclear (INPO) *por sus siglas en inglés: Institute of Nuclear Power Operations* y por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) (CFE, 2021).

Dentro de los planes más recientes propuestos por el país para aumentar el uso de energías limpias en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) del 2024, el Programa Indicativo de Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE) considera 2,350 MW de adición de capacidad nuclear, donde se espera que en el mediano plazo la tecnología nuclear para Centrales Eléctricas de menor capacidad sea accesible para su integración al Sistema Eléctrico Nacional (SENER, 2024).

Reactores de generación III, III+ y iv

Los diseños de los reactores nucleares de generación III y III+ no son el resultado de un proceso deliberado. El desarrollo de estos sistemas, al consistir en reactores de agua en ebullición con las mejoras más recientes, puede considerarse un proceso más natural; ya que actualmente los reactores que se encuentran en operación son aquellos que han logrado sobrevivir y son los más adecuados para operar de forma segura y sustentable (Goldberg & Rosner, s. f.). Estas mejoras consideran que la experiencia operativa es fundamental para garantizar la seguridad y buscan maximizar los beneficios derivados de la experiencia acumulada en la operación de reactores de generaciones anteriores con sistemas de generación similares (Bertran Barré *et al.*, 2016).

Por otro lado, la generación IV, aunque no posee conceptos básicos completamente nuevos, poseen características en sus diseños que merecen ser destacados, ya que representan diferencias significativas respecto a los sistemas anteriores (Marques, 2010). La Tabla 1 resume las principales características de los seis sistemas de generación IV que se encuentran actualmente en desarrollo.

Tabla 1. Características principales de los sistemas de generación IV (GIF, s. f.)

Sistema de generación	Espectro de neutrones	Refrigerante	Potencia (MWe)	Ciclo de combustible
Reactor de muy alta temperatura (VHTR)	Térmico	Helio	900-1000	Abierto
Reactor Rápido Enfriado por Sodio (SFR)	Rápido	Sodio	500-550	Cerrado
Reactor supercrítico enfriado por Agua (SCWR)	Térmico/Rápido	Agua	510-625	Abierto/Cerrado
Reactor Rápido Enfriado por Gas (GFR)	Rápido	Helio	850	Cerrado
Reactor Rápido Enfriado por Plomo (LFR)	Rápido	Plomo	480-570	Cerrado
Reactor de Sales Fundidas (MSR)	Térmico/Rápido	Sales de fluoruro	700-800	Cerrado

Caracterización de reactores nucleares

Durante la Caracterización de reactores nucleares se consideraron las siguientes variables que permitieron identificar tecnologías prometedoras:

1. *Capacidad térmica*: Representa el calor neto transferido del combustible al refrigerante (PRIS - Glossary, s. f.).
2. *Capacidad neta*: Unidad de referencia de potencias como se encuentra especificado en el diseño de la unidad original (IAEA, 2024).
3. *Tipo de ciclo*:
 - a. Abierto: No existe reprocesamiento de desechos nucleares (IAEA, 2019).
 - b. Cerrado: Existe reprocesamiento de desechos nucleares derivados de combustible irradiado (IAEA, 2019).
4. *Aplicaciones no eléctricas*: Producción de energía de salida en forma de calor o vapor (PRIS - Glossary, s. f.).
5. *Frecuencia de recarga*: Se refiere a la frecuencia de recarga de combustible derivada del ciclo de operación (Foro Nuclear, 2020).

Esta caracterización permitió estructurar una metodología de análisis de toma de decisión por ponderación con la intención de orientar a generar propuestas que respondan a los retos energéticos del país desde una perspectiva tecnológica. Por lo que los cinco puntos antes mencionados se convierten en criterios de evaluación para cada uno de los reactores evaluados.

Metodología de análisis de toma de decisión

La metodología de toma de decisiones para este trabajo se basó en el análisis de toma de decisión multicriterio por ponderación donde los pasos a seguir son los mostrados en la Figura 1.

Esta metodología consiste en hacer una evaluación de alternativas, que en este caso son los reactores nucleares y los criterios forman parte de la caracterización de los reactores, el resultado que se obtiene es una calificación global donde el puntaje más alto representa la alternativa a recomendar. El modelo matemático como se muestra en la Ecuación 1 que se utiliza para calcular el puntaje es:

$$S_j = \sum_i w_i r_{ij} \quad (1)$$

Donde: S_j = Calificación final para la alternativa j ; w_i = Ponderación de cada criterio i ; r_{ij} = rating de la alternativa j en función del criterio i

A partir de la caracterización, se generaron criterios de evaluación, los cuales son necesarios para completar el análisis, estos criterios se muestran por modelo de reactor, generación y tipo. Se consideraron los siguientes criterios: capacidad térmica, capacidad neta, ciclo de combustible, aplicaciones no eléctricas, frecuencia de recarga y estado. Para aquellos criterios cualitativos se realizó un procedimiento de normalización lineal, para ajustar los parámetros a un mismo nivel

de análisis, mientras que los criterios cuantitativos se llevaron a valores de verdad parciales entre 0 y 1 siendo 0 lo peor y 1 lo mejor, con la intención de representar matemáticamente la vaguedad e incertidumbre que genera lo cuantitativo.

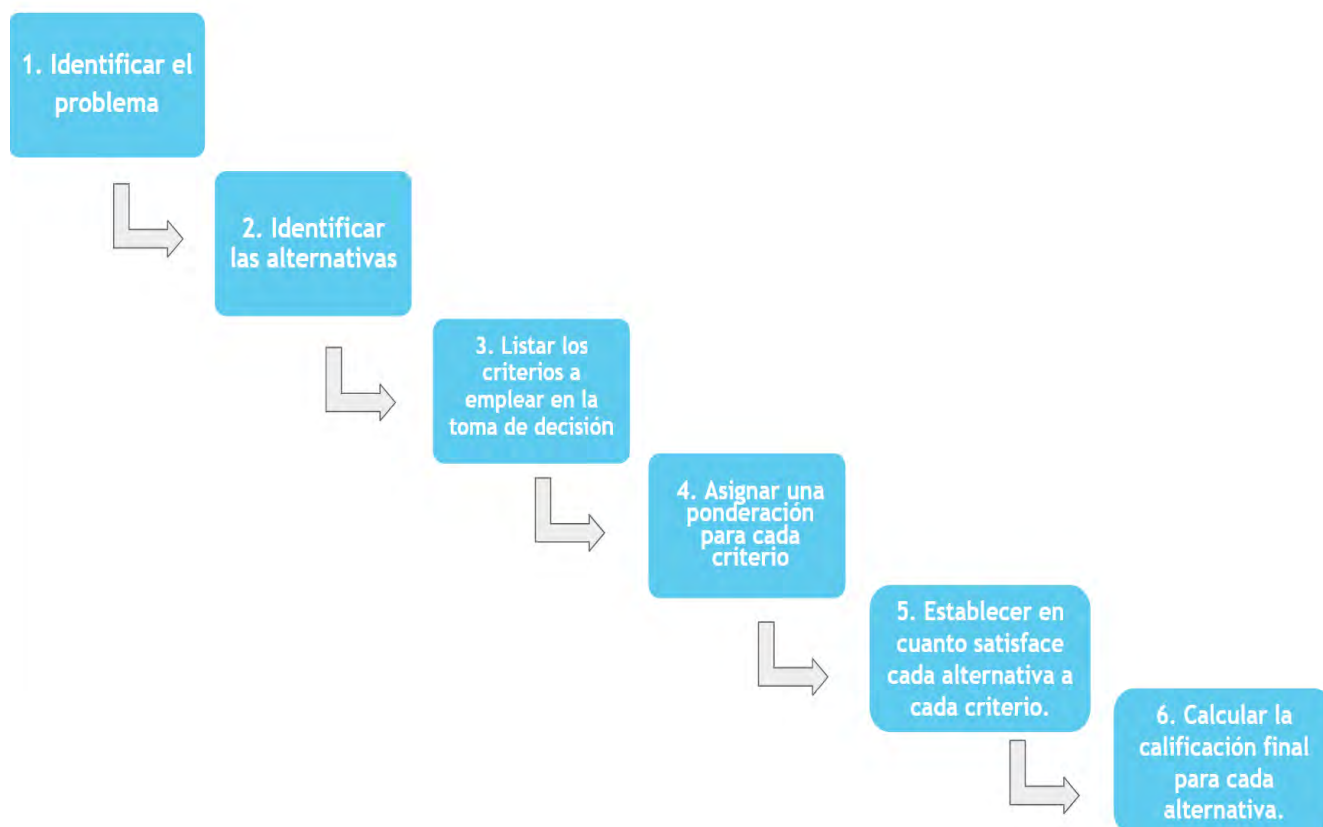


Figura 1. Pasos de metodología ponderación lineal (Elaboración propia)

Para este trabajo se realizaron dos escenarios en los cuales los pesos para realizar la ponderación fueron asignados según su relevancia en los casos de evaluación. En el primer escenario se priorizó la capacidad energética de los reactores, asignando un peso del 30% a la capacidad térmica y la capacidad neta de los reactores, seguidos de la frecuencia de recarga de combustible que contó con un peso del 20%, después a criterios como el ciclo de combustible y aplicaciones no eléctricas se les asignó un peso del 5%, adicionalmente los criterios de estado del reactor y generación obtuvieron un peso del 4%, por último el tipo de reactor recibió un peso del 2%.

Los pesos asignados para el escenario dos se encuentran estrechamente relacionados con la experiencia operativa y las aplicaciones no eléctricas obteniendo un peso del 25% respectivamente, seguidos de la capacidad energética, capacidad neta, tipo de ciclo de combustible y frecuencia de recarga de combustible. A estos criterios se les asignó un peso del 10% a cada uno, para finalizar con la generación y tipo de reactor los cuales recibieron un peso del 5% individualmente.

Para la aplicación de la metodología de toma de decisiones y sus escenarios se empleó una plantilla en Excel, en la que se definieron los criterios, las alternativas y sus respectivas ponderaciones de acuerdo con el escenario y se realizaron los cálculos necesarios. Los resultados obtenidos se presentan mediante gráficos, los cuales se describen y analizan en la siguiente sección.

Resultados y discusiones

A continuación, la Tabla 2 muestra la caracterización de los reactores nucleares en operación y en desarrollo correspondientes a las generaciones III, III+ y IV. El análisis se centró en dos criterios fundamentales: la experiencia operativa (OPEX) y la capacidad energética, aplicando una metodología de ponderación lineal.

Tabla 2. Caracterización de reactores de gen. II, III+ y IV en operación y desarrollo (IAEA, s. f.-a)

Modelo	Gen.	Tipo	Capacidad térmica (MWt)	Capacidad neta (MWe)	Ciclo de combustible	Aplicaciones no Eléctricas ¹	Frecuencia de recarga (meses)	Estado ²
ABWR	III	BWR	3926	1315	-	-	12-24	OP
ABWR-II	III+	BWR	4960	1638	-	-	18	DB
ESBWR	III	BWR	4500	1520	-	-	24	DB
KERENA	III+	BWR	3370	1250	-	-	24	DB
RMWR	III+	BWR	3926	1300	-	-	15	DB
BWRX-300	III+	BWR	870	300	-	AP	12-24	DD
AP-600	III	PWR	1940	600	-	-	24	DB
APR1000	III	PWR	2815	1000	-	-	24	DC
APR1400	III	PWR	3983	1400	Abierto	-	18	OP
APWR	III	PWR	4466	1500	-	-	-	DB
EPR	III	PWR	4590	1650	Abierto/ Cerrado	-	24	OP
AP 1000	III+	PWR	3400	1100	Abierto	AP, CU	18	OP
ACR-1000	III	PHWR	-	1370	-	-	36	DB
EM2	IV	GFR	500	1060	Abierto	-	360	DC
ALLEGRO	IV	GFR	75	-	-	-	-	ED
KAMADO FBR	IV	GFR	3000	1000	Cerrado	H2	12	DC
FMR	IV	GFR	100	42	Cerrado	AP	180	DC
MSFR	IV	MSR	3000	1500	-	-	Continuo	DC
SmAHTR	IV	MSR	125	-	-	H2	6	ED
IMSR400	IV	MSR	442	390	Abierto/ Cerrado	AP, CP	Continuo	DD
FUJI	IV	MSR	450	200	Cerrado	DS, H2	Continuo	DC
ALFRED	IV	LFR	300	125	-	-	12	DC
ELFR	IV	LFR	1500	630	-	-	30	DC
G4M	IV	LFR	70	25	-	AP	120	DC
PEACER	IV	LFR	850	300	-	-	12	DC
W-LFR	IV	LFR	950	460	-	AP	24	DC
CSR1000	IV	SCWR	2300	1000	Cerrado	-	18	DC
HP-LWR	IV	SCWR	2300	1000	-	-	11	DC
JSCWR	IV	SCWR	3681	750	-	-	26	DC
ASTRID	IV	SFR	1500	600	-	-	48	DC
BN-1200	IV	SFR	2800	1140	-	-	-	DD
CFR-600	IV	SFR	1500	600	-	-	-	DC
FBR-1 & 2	IV	SFR	1250	500	-	-	8	DD
JSFR	IV	SFR	3530	750	-	-	26	DC
PRISM	IV	SFR	840	311	-	-	18	DD
TWR-P	IV	SFR	1475	600	-	-	24	DC
ARC-100	IV	SFR	286	-	-	AP-Producción de isótopos	120-240	DC

¹ La columna de aplicaciones no eléctricas indica el uso de la instalación para proveer: AP: Ajuste de producción, DS: Desalinización, H2: Producción de hidrógeno, CU: Calefacción urbana, CP: Calor de proceso.

² La columna de Estado indica el estado del sistema: OP: En operación, ED: En diseño, DC: Diseño conceptual, DB: Diseño básico, DD: Diseño desarrollado.

Análisis de resultados

La Figura 2 muestra una evaluación comparativa cualitativa de diferentes reactores nucleares en función de su capacidad energética, uno de los criterios clave para su posible incorporación en estrategias de diversificación energética. El análisis evidencia que no todos los reactores evaluados ofrecen niveles similares de capacidad, hecho que permite distinguir los modelos que presentan ventajas competitivas en este aspecto.

Reactores como el reactor de sales fundidas MSFR (*Molten Salt Fast Reactor*), Reactor europeo presurizado EPR y el reactor avanzado de agua en ebullición ABWR-II destacan al presentar los valores más altos en este criterio, lo que indica que estos reactores cuentan con una capacidad proyectada adecuada para responder de manera más eficiente a las demandas energéticas actuales y futuras. El hecho de que estos reactores pertenezcan tanto a las generaciones III, III+ y IV indica como la innovación tecnológica ha permitido alcanzar niveles de capacidad competitivos a lo largo de las distintas etapas de desarrollo.

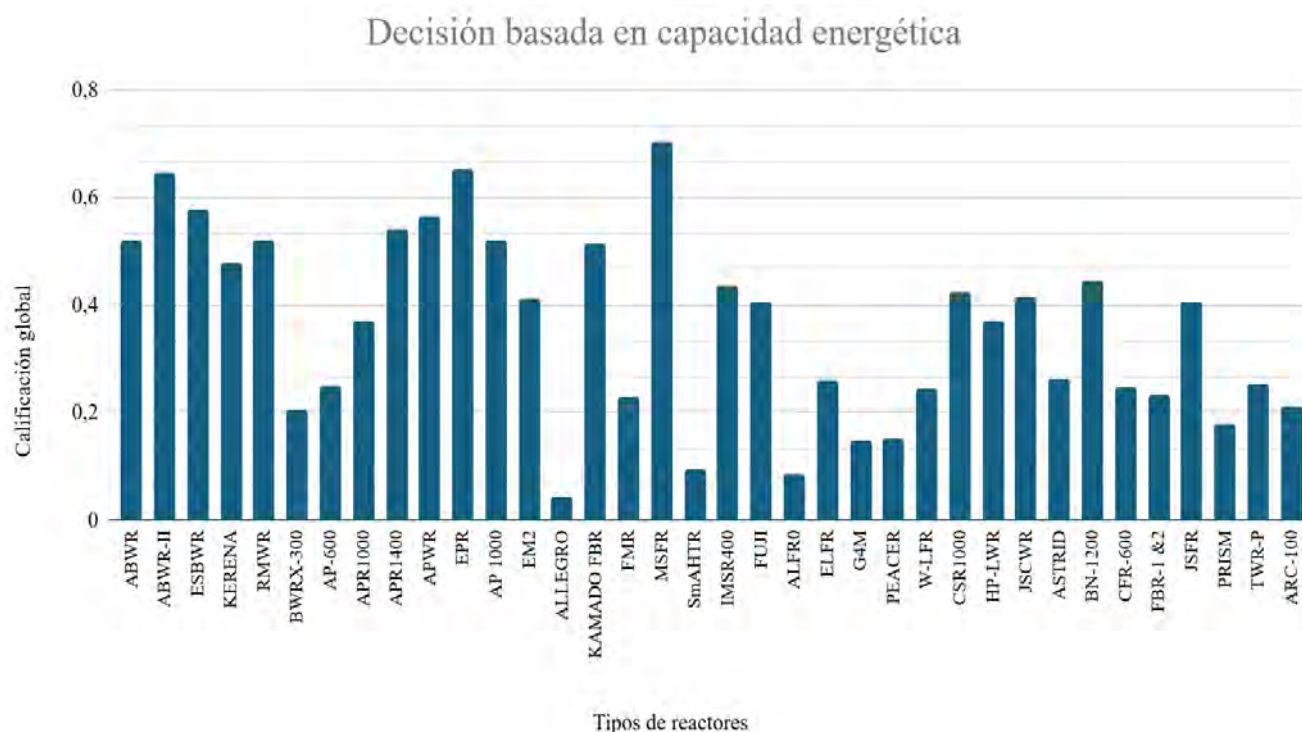


Figura 2. Resultados del análisis cualitativo basado en la capacidad energética de los modelos evaluados de reactores nucleares pertenecientes a las generaciones III, III+ y IV

La evaluación de la experiencia operacional y aplicaciones permite identificar tecnologías que no solo han demostrado confiabilidad a lo largo del tiempo, sino que también ofrecen una mayor versatilidad en su aplicación. La Figura 3 presenta una comparación cualitativa de distintos reactores nucleares con base en su capacidad energética y se observa una clara ventaja en aquellos reactores que cuentan con unidades en funcionamiento, lo que refleja madurez tecnológica y un historial comprobado de desempeño. Por otro lado, las aplicaciones no eléctricas se han convertido en un componente estratégico dentro del desarrollo de nuevas tecnologías. En este sentido, algunos reactores de nueva generación, aunque poseen menor experiencia operativa, destacan por su capacidad de integración a procesos industriales. El análisis de ambos criterios revela el equilibrio entre confiabilidad y multifuncionalidad, siendo especialmente valiosos aquellos reactores que logran combinar una trayectoria operativa con un diseño adaptable a usos no eléctricos.

En particular el reactor de agua a presión AP 1000 sobresale por presentar valores significativos en el análisis en conjunto de los criterios. Su capacidad para modular la producción de energía según la demanda lo convierte en una alternativa estratégica. Esta flexibilidad operativa lo posiciona como una opción coherente con los planes de expansión

del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), los cuales proponen la incorporación de centrales eléctricas de menor capacidad y contribuyen a su vez a impulsar una transición energética más limpia.

Decisión basada en experiencia operacional y aplicaciones

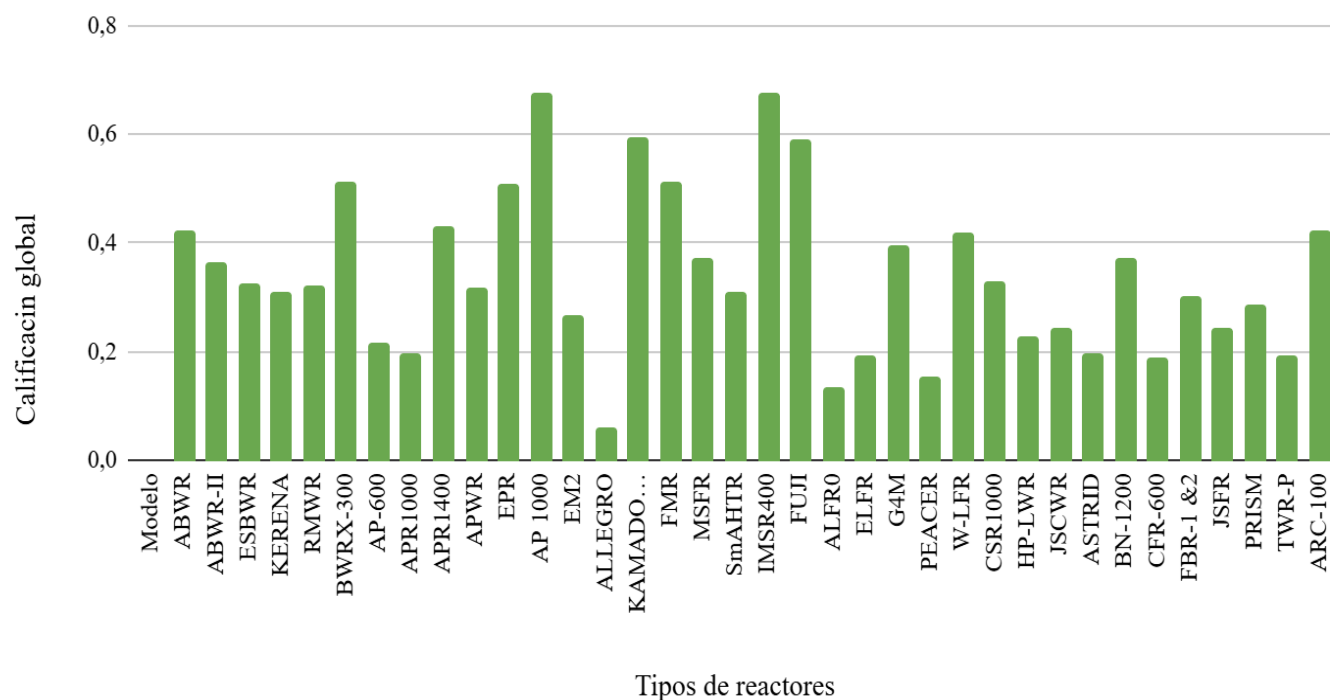


Figura 3. Resultados del análisis cualitativo basado en la experiencia de operación y aplicaciones de los modelos evaluados de reactores nucleares pertenecientes a las generaciones III, III+ y IV

Conclusiones

Se realizó un análisis de reactores nucleares de nueva generación para conseguir una transición energética más limpia en México. El análisis cualitativo permitió identificar tecnologías nucleares de nueva generación con un balance favorable entre experiencia operativa y capacidad energética, factores clave para su posible integración en una estrategia de diversificación de la matriz energética nacional.

El análisis de toma de decisión mostró que reactores como el MSFR y AP 1000 sobresalen por su grado de madurez tecnológica y adaptabilidad operativa lo que subraya la importancia de fomentar el aprovechamiento de tecnologías avanzadas como vía para fortalecer la seguridad energética del país y avanzar hacia una transición energética sostenible. En este sentido, los resultados del estudio son un punto de partida para que se promueva mayor investigación sobre ese tipo de reactores, su desarrollo e implementación en el país, esto como parte integral de una visión energética futura alineada con los compromisos nacionales e internacionales que México tiene en materia del cambio climático y sostenibilidad.

Bibliografía

- Aznar-Bellver, J. e. (2012). *Valoración inmobiliaria. Métodos y aplicaciones*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Bertran Barré, P., Anzieu, P., Lenain, R., & Thomas, J.-B. (2016). *Nuclear reactor systems: A technical, historical and dynamic approach*. EDP Sciences.
- Brook, B. W., Alonso, A., Meneley, D. A., Misak, J., Blees, T., & Van Erp, J. B. (2014). Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. *Sustainable Materials and Technologies*, 1–2, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.001>
- Ceballos Pérez, S. G. (2020). Infraestructura verde y planeación urbana, elementos clave para una ciudad sustentable. En S. G. Ceballos Pérez, J. Villanueva Solís y J. A. Quiroga Herrera (Dirs.), *Importancia de la infraestructura verde y la planeación para el desarrollo urbano sustentable* (pp. 6–27). Recuperado de http://elcolegiodehidalgo.edu.mx/descargas/publicaciones/epub/infraestructura_verde_planeacion.pdf

- CFE. (2021, junio 12). Laguna Verde opera de manera segura y eficiente; hay campaña de desprestigio contra la central por afectar intereses privados. Portal CFE. Recuperado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2194>
- CFE. (2022, agosto 8). Aporta la Central Nuclear Laguna Verde el 18 por ciento de la energía limpia generada en México. Portal CFE. Recuperado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2613>
- Chater, J. (s. f.). *A history of nuclear power*.
- Cordera Campos, R., & Provencio Durazo, E. (2018). *Propuestas estratégicas para el desarrollo 2019–2024* (Informe del desarrollo en México, p. 280). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Foro Nuclear. (2020, enero 23). Paradas de recarga de las centrales nucleares. *Foro Nuclear*. Recuperado de <https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/paradas-de-recarga-de-las-centrales-nucleares/>
- GIF. (s. f.). *Generation IV Goals, Technologies and GIF R&D Roadmap*. Recuperado 14 de abril de 2025 de <https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies>
- Goldberg, S. M., & Rosner, R. (s. f.). *Nuclear Reactors: Generation to Generation*.
- IAEA. (s. f.-a). *Advanced Reactor Information System (ARIS)*. Recuperado 24 de marzo de 2025 de <https://aris.iaea.org/undefined>
- IAEA. (s. f.-b). *PRIS – Country Details*. Recuperado 20 de marzo de 2025 de <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=MX>
- IAEA. (2016, diciembre 16). What is Low Enriched Uranium (LEU) and how it is stored at the IAEA LEU Bank? Recuperado de <https://www.iaea.org/topics/leubank/what-is-leu>
- IAEA. (2019). *Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles* (Nuclear Energy Series No. NW-T-1.7, p. 117). Recuperado de <https://www.iaea.org/publications/12226/waste-from-innovative-types-of-reactors-and-fuel-cycles>
- IAEA. (2024). *Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States (OPEX)*.
- Internationale Atomenergie-Organisation (Ed.). (2005). *Comparative assessment of energy options and strategies in Mexico until 2025: Final report of a coordinated research project 2000–2004*. IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1469_web.pdf
- Khalil, H., Bennett, R., & Versluis, R. (s. f.). *The Generation IV Nuclear Energy Systems Technology Roadmap*.
- Kiegiel, K., Chmielewska-Smientanko, D., Herdzyk-Koniecko, I., Miskiewicz, A., Smolinski, T., Rogowski, M., Ntang, A., Kiprono Rotich, Madaj, K., & Chmielewski, A. G. (2025, enero 29). The future of nuclear energy: Key chemical aspects of systems for developing Generations III+, Generation IV, and Small Modular Reactors. *Energies*, 53. <https://doi.org/10.3390/en18030622>
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to nuclear engineering* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Marques, J. G. (2010). Evolution of nuclear fission reactors: Third generation and beyond. *Energy Conversion and Management*, 51(9), 1774–1780. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.043>
- Murakami, T. (2021). A historical review and analysis on the selection of nuclear reactor types and implications to development programs for advanced reactors; A Japanese study. *Energy Reports*, 7, 3428–3436. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.05.049>
- PRIS – Glossary. (s. f.). Recuperado 24 de marzo de 2025 de <https://pris.iaea.org/pris/glossary.aspx>
- SENER. (2021, febrero 3). Por medio de la energía nuclear, nuestro país garantiza el suministro de electricidad. Recuperado de <http://www.gob.mx/sener/articulos/por-medio-de-la-energia-nuclear-nuestro-pais-garantiza-el-suministro-de-electricidad?idiom=es>
- SENER. (2024, mayo 31). *PRODESEN 2024–2038*. Recuperado de <https://base.energia.gob.mx/PRODESEN2024/prodesen24-38cap0.PDF>
- Tarakanov, V. (2023, septiembre 15). ¿Qué es el uranio? Recuperado de <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/what-is-uranium>
- Torres Flores, R. C. (2020). Transición energética: Obstáculo o estímulo al desarrollo. *Economía UNAM*, 17(49), 46–65. <https://www.scielo.org.mx/pdf/eunam/v17n49/1665-952X-eunam-17-49-46.pdf>

Ceniza de bagazo de caña de azúcar: Materia prima para la síntesis de un vidrio

Zaida Jocelyn Martínez-Hurtado ¹, Claudia Anais Martínez-Dimas ¹, Teresa de Jesús Montalvo-Herrera ¹, Juan Jacobo Ruíz-Valdés ¹, Juan Manuel Hernández-López ¹, Enrique Alfonso López-Guajardo ², David Clemente López-Pérez ³, Astrid Iriana Sánchez-Vázquez ^{1,*}

¹ Laboratorio Materiales 3, Ingeniería Química, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ciencias Químicas, UANL, Vicente Guerrero s/n, Treviño, 64570 Monterrey, N.L., México

² Tecnológico de Monterrey, avenida Eugenio Garza Sada, 2501, 64849, Monterrey, N.L., México

³ Instituto de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, UANL, Avenida Universidad s/n, Anáhuac, 66455 San Nicolás de los Garza, N.L.

* Autor de correspondencia: astrid.sanchezvz@uanl.edu.mx; Tel.: +52 81 8654 9783

Desarrollo Sustentable (Materiales Sustentables)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 23 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.526>

Resumen: El uso de materias primas convencionales para la elaboración de vidrio representa un alto consumo de recursos naturales y energía. Ante esta problemática, se plantea la utilización de residuos agroindustriales como alternativa sostenible, destacando la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) por su alto contenido de dióxido de silicio (SiO_2). No obstante, su aplicación se ve limitada por la presencia de impurezas metálicas como el hierro (Fe), que afectan negativamente las propiedades ópticas del vidrio. En este trabajo se evaluó la viabilidad de formular un vidrio a partir de CBC purificada mediante lixiviación con ácido oxálico, empleando condiciones de 4% p/p, 60 °C y 2 h de reacción. El material resultante se caracterizó mediante FRX, DRX, UV-Vis, SEM y DTA/TGA para determinar su composición química, estructura amorfa y comportamiento térmico. Se obtuvieron vidrios transparentes con menor tonalidad ámbar conforme disminuyó el contenido de Fe, alcanzando una concentración final de 0.24% para la CBC tamizada a malla 200. La formulación incluyó 30% de carbonato de potasio (K_2CO_3) como fundente, logrando un buen vaciado. Las propiedades mecánicas fueron evaluadas mediante pruebas de flexión, compresión y dureza, obteniéndose valores comparables al vidrio comercial. La temperatura de transición vítrea estimada fue de 646 °C y se validó mediante recocido térmico. Los resultados obtenidos permiten verificar que la CBC tratada con ácido oxálico constituye una materia prima viable para la obtención de un vidrio amorfo funcional, con propiedades físicas y mecánicas aceptables, y con potencial de aplicación en materiales de uso general, contribuyendo así a la valorización de residuos agroindustriales.

Palabras clave: ceniza de bagazo de caña, vidrio, ácido oxálico

Sugarcane bagasse ash: Raw material for the synthesis of a glass

Abstract: The use of conventional raw materials for glass production involves high consumption of natural resources and energy. To address this issue, agro-industrial waste has been proposed as a sustainable alternative, with sugarcane bagasse ash (SCBA) standing out due to its high silica (SiO_2) content. However, its direct application is limited by the presence of metallic impurities, particularly iron (Fe), which negatively affect the optical properties of glass. This work evaluates the feasibility of formulating a glass from SCBA purified through leaching with oxalic acid, under conditions of 4 wt%, 60 °C, and 2 h of reaction. The resulting material was characterized by XRF, XRD, UV-Vis, SEM, and DTA/TGA to determine its chemical composition, amorphous structure, and thermal behavior. Transparent glasses were obtained, showing reduced amber coloration as Fe content decreased, reaching a final concentration of 0.24 wt% for SCBA sieved to mesh 200. The formulation included 30 wt% potassium carbonate (K_2CO_3) as flux, enabling proper flow during casting. Mechanical properties were evaluated through flexural, compressive, and hardness tests, yielding values comparable to commercial glass. The estimated glass transition temperature was 646 °C, validated through thermal annealing. The results demonstrate that SCBA treated with oxalic acid is a viable raw material for the production of functional amorphous glass with acceptable physical and mechanical properties, showing potential for general-purpose applications and contributing to the valorization of agro-industrial waste and the development of more sustainable processes.

Keywords: sugarcane bagasse ash, glass, oxalic acid

Introducción

El uso de materias primas convencionales para la elaboración de vidrio, como arena sílica (SiO_2), óxido de calcio (CaO) y óxido de sodio (Na_2O), representa un consumo intensivo de recursos minerales y energéticos (Musgraves *et al.*, 2019). En un contexto global que exige procesos más sostenibles, la sustitución parcial o total de estos insumos por residuos, con potencial valor agregado, ha cobrado relevancia en el ámbito de los materiales. En particular, la ceniza de bagazo

de caña de azúcar (CBC), un subproducto agroindustrial generado en los ingenios azucareros durante la producción de energía ha sido estudiada por su alto contenido de dióxido de silicio (Askeland *et al.*, 2013 y ASTM, 1980).

Diversas investigaciones han reportado la viabilidad técnica de emplear CBC como fuente alternativa de sílice para la síntesis de materiales vítreos (Weyl, 2016). Sin embargo, su aplicación directa puede verse limitada por la presencia de impurezas metálicas, especialmente hierro (Fe), que inducen coloración en el producto final y alteran sus propiedades ópticas (Rincón, 2003). Para superar esta limitación, se han propuesto métodos de purificación como la lixiviación con ácidos orgánicos, capaces de remover selectivamente estos contaminantes sin comprometer la composición silícea del material (Teixeira, *et al.* 2014).

En este trabajo se plantea la utilización de CBC purificada mediante lixiviación con ácido oxálico para la síntesis de un vidrio amorfo. Se evalúan sus propiedades térmicas, ópticas y mecánicas, así como su estabilidad estructural. Esta propuesta busca aprovechar un residuo abundante en la región, reducir la dependencia de recursos minerales y contribuir a la producción de materiales más sostenibles.

Materiales y Métodos

Como fuente de materia prima se utilizó CBC proveniente del ingenio azucarero “El Mante”, ubicado al sur del estado de Tamaulipas, México. Se manejó el ácido oxálico dihidratado $((\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$, grado reactivo a 99.58% como agente lixivante y carbonato de potasio (K_2CO_3) grado $\geq 99\%$ como agente fundente.

La metodología se dividió en 3 etapas: Para la primera etapa se realizó una disminución de tamaño de partícula de la CBC por medio de una molienda y tamizado por medio de tres mallas (No. 100, 200 y 400) hasta obtener un tamaño de partícula $<45 \mu\text{m}$, posteriormente se llevó a cabo una caracterización inicial mediante fluorescencia de rayos-X (FRX) y difracción de rayos-X (DRX). En la segunda etapa se realizó el tratamiento térmico de la CBC en horno eléctrico a 900°C durante 2 horas para la eliminación de materia orgánica, así como la lixiviación de la ceniza con ácido oxálico para la remoción de hierro (Fe), se realizaron sus respectivas caracterizaciones por absorción atómica de flama (AAF) y fluorescencia de rayos-X (FRX). En la etapa final se realizó la síntesis del vidrio, la cual se realizó a una temperatura máxima de 1450°C durante 2 horas en horno de alta temperatura. Posteriormente, las muestras fueron enfriadas a temperatura ambiente y recocidas a 600°C , posteriormente se caracterizó por medio de DRX, DTA/TGA, colorimetría del vidrio y pruebas mecánicas. La Figura 1 resume las etapas del procedimiento experimental propuesto.

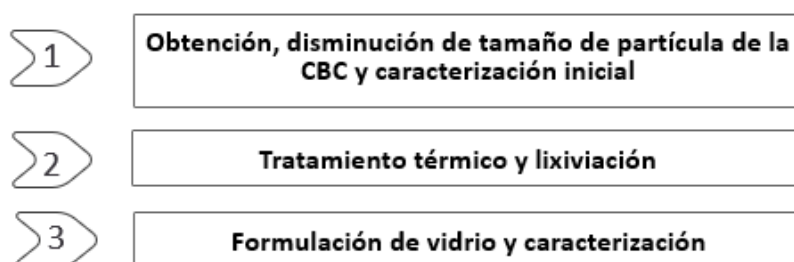


Figura 1. Etapas de procedimiento experimental propuesto

Resultados y Discusión

Etapas 1. Caracterización de la materia prima

Distribución de tamaño de partícula

La Figura 2 presenta la distribución del tamaño de partícula de la CBC antes de ser sometida a tratamiento térmico y químico. En la fracción tamizada con malla 100, se observa que el 36% del volumen corresponde a partículas con diámetros entre 149 y $74 \mu\text{m}$, el 62% se concentra entre 74 y $35 \mu\text{m}$, y únicamente el 1% presenta tamaños inferiores a $35 \mu\text{m}$. La predominancia de partículas menores a $149 \mu\text{m}$ se asocia al proceso de incineración del bagazo durante su aprovechamiento energético, lo cual favorece la fragmentación térmica del material.

Por otra parte, en la fracción correspondiente a malla 200, el 80% del volumen se encuentra en el intervalo de 74 a 35 μm , mientras que el 20% restante corresponde a partículas inferiores a 35 μm . El incremento en la proporción de partículas finas (<35 μm) se atribuye al efecto del molino vibratorio empleado para optimizar la homogenización del material previo a su caracterización.

Fluorescencia de rayos-X (FRX)

El análisis por Fluorescencia de Rayos X (FRX) permitió determinar la composición de óxidos metálicos presentes en la CBC, identificándose al dióxido de silicio (SiO_2) como el componente mayoritario, con una proporción cercana al 68% en peso (ver Tabla 1). Este contenido es comparable al de vidrios comerciales tipo sódico-cálcico, lo que posiciona a la CBC como una materia prima viable para la síntesis de materiales vítreos. (Teixeira, *et al.* 2014)

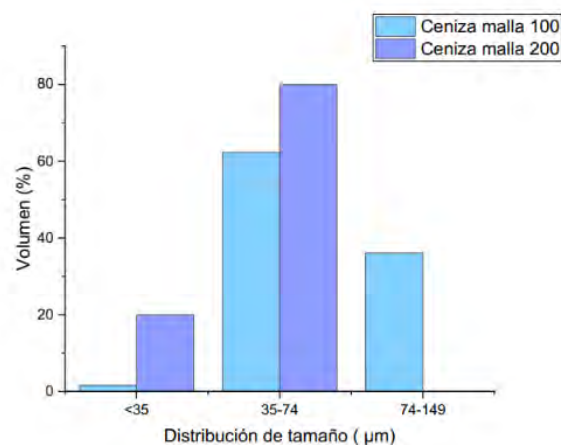


Figura 2. Gráfica de distribución de tamaño de partícula para ceniza malla 100 y ceniza malla 200

Cabe señalar que la CBC no presenta óxido de sodio (Na_2O), el cual cumple la función de fundente esencial en la fabricación convencional de vidrio. No obstante, dicha función puede ser cubierta por otros óxidos alcalinos. En este caso, se propone el uso de carbonato de potasio (K_2CO_3) como fuente de óxido de potasio (K_2O), el cual no solo actúa como fundente alternativo al Na_2O , sino que además contribuye a mejorar la dureza del vidrio obtenido.

Tabla 1. Composición de CBC determinada por FRX y de un vidrio común (Yahya, *et al.* 2017)

Compuesto	%P/P	
	CBC	Vidrio comercial
SiO_2	68.33	70-75
Na_2O	0.00	12.5-15
MgO	0.36	1-5
Al_2O_3	1.52	0.5-2
CaO	15.42	4-10
K_2O	5.35	0-1
P_2O_6	2.16	
TiO_2	0.44	
Fe	4.09	
Otros	1.06	

En relación con otros elementos presentes en la CBC, el análisis por FRX reveló un contenido de hierro (Fe) cercano al 4% en peso. Según los criterios establecidos en la normativa nacional para la fabricación de vidrio de uso en construcción, el contenido máximo permitido de Fe en la arena sílica es de 0.3% (Fernandez, 1991). Bajo este parámetro, la CBC no cumple con los requisitos establecidos como materia prima directa. Por esta razón, se implementó un tratamiento de purificación mediante lixiviación con un ácido orgánico, específicamente ácido oxálico, con el fin de reducir la concentración de hierro y mejorar la calidad óptica del material.

Difracción de rayos-X (DRX)

El análisis por Difracción de Rayos-X (DRX) se realizó con el objetivo de identificar las fases cristalinas presentes en la CBC y contrastarlas con los resultados obtenidos mediante la caracterización elemental por Fluorescencia de Rayos-X (FRX). En el difractograma de la Figura 3 se observan picos definidos correspondientes a estructuras cristalinas asociadas con los elementos mayoritarios previamente identificados. El silicio (Si) y el oxígeno (O) se detectan en forma de dióxido de silicio, específicamente como cuarzo y tridimita (SiO_2), mientras que el calcio (Ca) se encuentra presente en fase de calcita (CaCO_3).

Según el diagrama de fases de los polimorfos del dióxido de silicio (SiO_2) (ver Figura 4), a presiones bajas, el cuarzo- α (de estructura cristalina trigonal) es estable a temperaturas inferiores a 600 °C. Al superar esta temperatura, se transforma en cuarzo- β con estructura hexagonal, y a partir de 870 °C se favorece la formación de tridimita, también de simetría hexagonal. La detección de estas fases en la CBC sugiere que el material fue expuesto a temperaturas superiores a 800 °C durante el proceso de incineración del bagazo en las calderas, lo cual induce transiciones de fase asociadas a reordenamientos estructurales impulsados por la energía térmica. Por otro lado, la presencia de calcita (CaCO_3) puede atribuirse a la reacción del calcio presente en el material con dióxido de carbono (CO_2), generado durante la combustión del residuo.

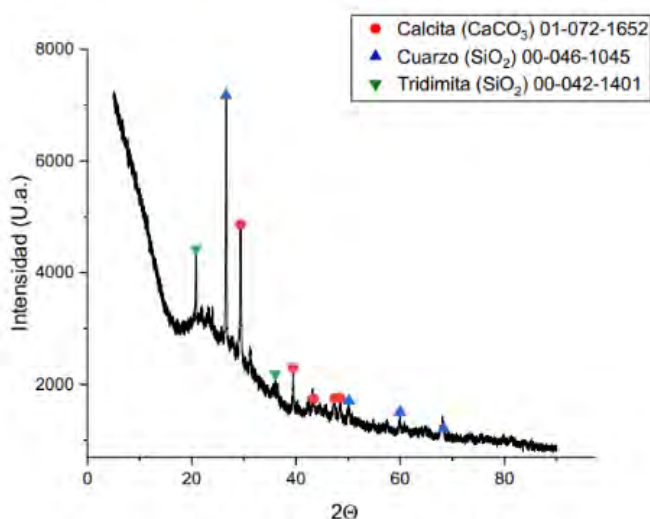


Figura 3. Difractograma de CBC previo a tratamientos

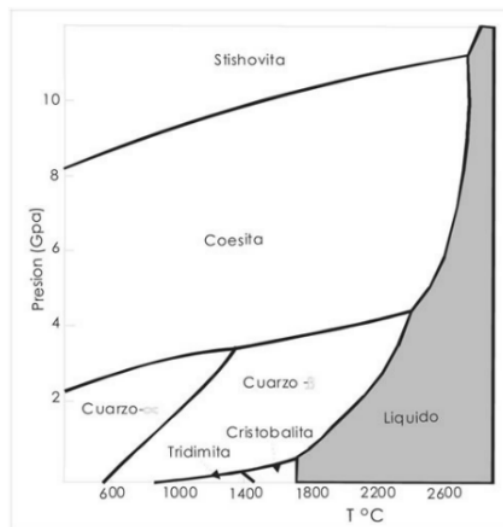


Figura 4. Diagrama de fases de polimorfos del óxido de silicio (SiO_2)

Etapa 2. Tratamiento térmico y lixiviación

Considerando que en ciertos tratamientos aplicados a residuos agroindustriales se ha documentado una remoción eficiente de metales sin necesidad de calcinación previa, se opta por realizar la lixiviación directamente sobre la CBC sin tratamiento térmico. Esta decisión se fundamenta en antecedentes experimentales que indican que la presencia de materia orgánica no representa una limitante significativa para la extracción de hierro (Fe) bajo condiciones adecuadas de concentración, temperatura y tiempo de reacción.

Fluorescencia de rayos-X

Se evaluó la eficiencia del ácido oxálico ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) como agente lixivante para la remoción de hierro (Fe) y la modificación de la composición química de la CBC tamizada a malla 100 ($<149 \mu\text{m}$). Las pruebas se realizaron con concentraciones de 3% y 4% (p/p), a temperaturas de 60 °C y 90 °C, y con tiempos de reacción de 2 y 6 horas. Las Figuras 5 y 6 presentan los resultados de composición elemental de las muestras tratadas bajo estas condiciones.

Se observa que el contenido de dióxido de silicio (SiO_2) se incrementa en todas las condiciones evaluadas, alcanzando valores entre 75% y 79.5%. Este aumento se asocia a la eliminación parcial de componentes secundarios sin afectar significativamente el óxido de calcio (CaO), el cual no es solubilizado eficientemente por el ácido oxálico. Asimismo, se registra una disminución en el contenido de óxido de potasio (K_2O), lo que implica la necesidad de ajustar su proporción durante la formulación vítrea mediante la adición de carbonato de potasio (K_2CO_3), aunque en cantidades menores respecto a otras rutas de tratamiento.

$$-K_L = \frac{V \ln \left(\frac{C_s - C}{C_s} \right)}{t A} \quad (1)$$

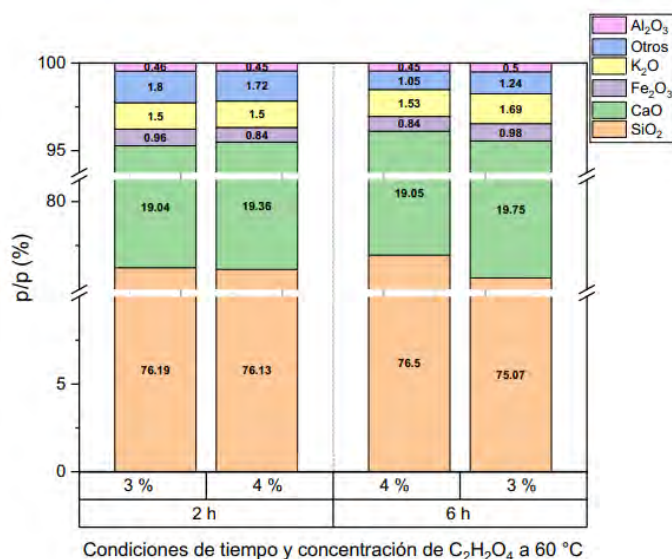


Figura 5. Composición p/p (%) de CBC lixiviada a 60 °C a diferentes condiciones de tiempo y concentraciones de C₂H₂O₄

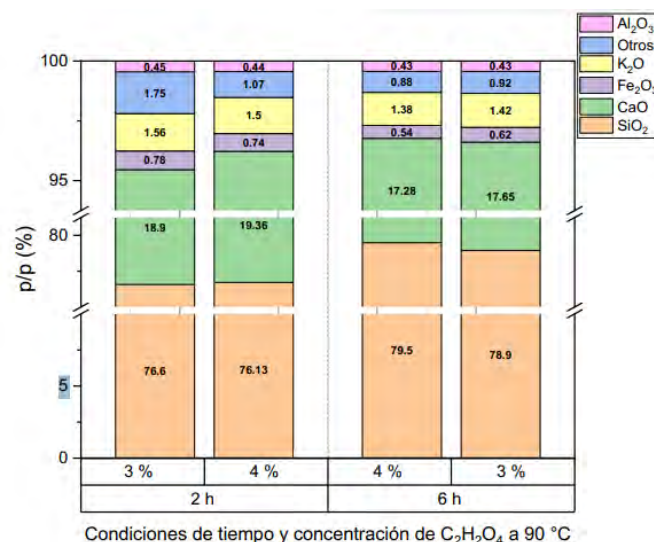


Figura 6. Composición p/p (%) de CBC lixiviada a 90 °C a diferentes condiciones de tiempo y concentraciones de C₂H₂O₄

Una vez establecidas las condiciones óptimas de concentración, temperatura y tiempo (4% de ácido oxálico, 60 °C y 2 h), se procedió a realizar lixiviaciones sobre CBC con tamaño de partícula inferior a 74 μm. El objetivo fue evaluar si una reducción en el tamaño de partícula favorece la eficiencia en la remoción de hierro (Fe), al incrementar el área superficial de contacto. La Tabla 2 presenta los resultados correspondientes al contenido de Fe total (expresado en porcentaje en peso) en las muestras lixiviadas bajo dichas condiciones. La cuantificación se realizó mediante espectroscopía de absorción atómica de flama (AAF).

Tabla 2. Resultados de % w/w de Fe presente en ceniza malla 200 (≤ 74 μm) lixiviada con 4% de ácido a 60 °C

Tiempo (h)	Fe presente en CBC lixiviada con C ₂ H ₂ O ₄ (%w/w)
2	0.242
6	0.196

La Figura 7 presenta los porcentajes de reducción de hierro obtenidos para CBC con dos tamaños de partícula (<149 μm y <74 μm), bajo condiciones constantes de temperatura, concentración y tiempo de reacción. Se observa que la disminución del tamaño de partícula a <74 μm mejora significativamente la eficiencia en la remoción de Fe, lo cual se atribuye al incremento en el área superficial disponible para la interacción ácido-sólido. Por lo tanto, se establecen como condiciones óptimas para la remoción de hierro (Fe) en la CBC: un tamaño de partícula menor a 74 μm, temperatura de 60 °C, 2 h de reacción y una concentración de 4% de ácido oxálico (C₂H₂O₄).

Difracción de rayos-X (DRX)

Se realizó un análisis por Difracción de Rayos X (DRX) a la ceniza resultante después del proceso de lixiviación con ácido oxálico y posterior calcinación, con el propósito de identificar las fases

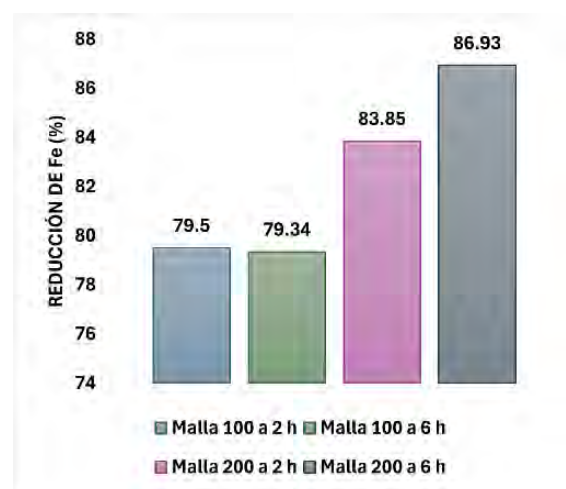


Figura 7. Comparación de reducción de Fe para ceniza malla 100 (tamaño de partícula ≤149 μm) y malla 200 (tamaño de partícula ≤ 74 μm)

crystalinas presentes. La Figura 8 muestra el difractograma correspondiente a la CBC tamizada a malla 200, tratada con una solución al 4% de ácido oxálico ($C_2H_2O_4$), a 60 °C durante 2 h de reacción.

En los difractogramas obtenidos tras la lixiviación con ácido oxálico y posterior calcinación, se identifican principalmente las mismas fases cristalinas previamente observadas en la CBC sin tratamiento (Figura 3), como el cuarzo y la tridimita, los cuales permanecen estables durante el proceso. No se detecta la presencia de wollastonita-2M, lo cual es coherente con los resultados de la caracterización química por FRX, que indican una menor concentración de calcio tras el tratamiento con ácido oxálico.

En cuanto a las fases de hierro, se identifican hematita (Fe_2O_3) y wustita (FeO). La proporción relativa de wustita es menor, lo cual puede atribuirse a su mayor susceptibilidad a la descomposición térmica. Por otro lado, la hematita, debido a su estructura más estable, muestra una mayor persistencia bajo las condiciones aplicadas, lo que también se refleja en su menor solubilidad en comparación con la wustita.

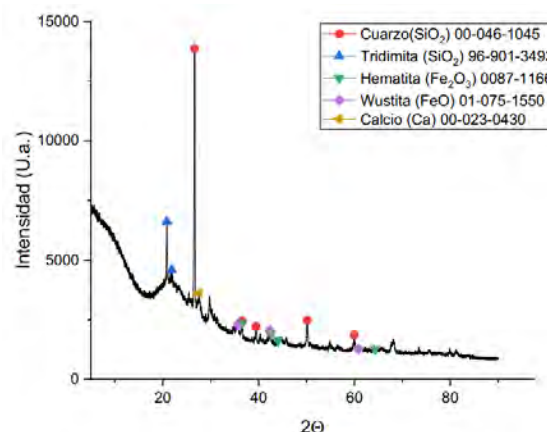


Figura 8. Difractograma CBC lixiviada con 4% de ácido oxálico ($C_2H_2O_4$) a 60 °C y 2 h de reacción

Etapas 3. Caracterizaciones del vidrio.

Difracción de rayos-X

La Figura 9 presenta el difractograma del vidrio obtenido a partir de CBC sin tratamiento de lixiviación. Como se observa, no se registran picos definidos que indiquen la presencia de fases cristalinas, lo cual es consistente con la naturaleza amorfa del material, característica típica de los vidrios. Adicionalmente, se identifica una señal difusa en forma de hombro en la región comprendida entre 20° y 30° 2θ, la cual puede asociarse a la presencia de dióxido de silicio (SiO_2), principal componente de la matriz vítrea. Estos resultados confirman que el producto obtenido mediante fusión corresponde efectivamente a un vidrio amorfo.

Análisis térmico diferencial y termogravimétrico (DTA/TGA)

La figura 10 muestra los resultados por análisis DTA del vidrio con CBC lixiviada con 4% de ácido oxálico a 60 °C y 2 h de reacción.

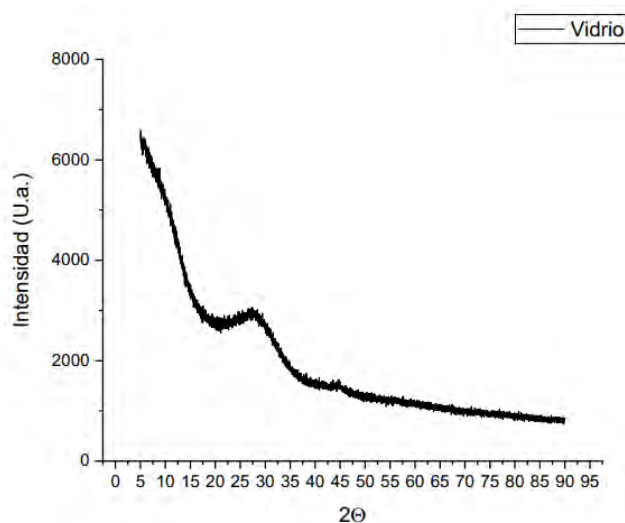


Figura 9. Difractograma del vidrio sin previo tratamiento

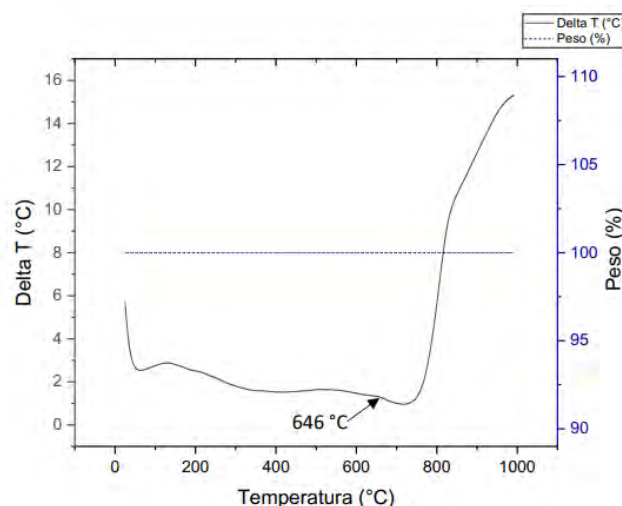


Figura 10. Análisis térmico diferencial para vidrio con CBC lixiviada con 4% de $C_2H_2O_4$, 60 °C en 2 h de reacción

Los análisis DTA se realizaron hasta una temperatura máxima de 1000 °C, límite del equipo. En ambos termogramas se observa un pico amplio cercano a 900 °C, correspondiente a la temperatura de cristalización T_c ; no obstante, este valor no resulta relevante en este estudio, ya que el objetivo es obtener un vidrio amorfo y no un material vitrocerámico.

El enfoque principal fue la determinación de la temperatura de transición vítrea (T_g), parámetro crítico en vidrios, el cual, según diversos reportes en la literatura (Yahya, *et al.* 2017, Fernández, 1991, Pérez Casas, 2018 y Dávalos, *et al.*, 2020) se encuentra típicamente entre 600 y 800 °C para materiales con alto contenido de sílice. Debido a la baja resolución del equipo, se aplicó el cálculo de la derivada sobre el DTA, obteniéndose un T_g de aproximadamente 646 °C para el vidrio tratado con ácido oxálico.

Con el fin de validar este valor, se realizaron recocidos a 500, 600 y 650 °C. A 650 °C se observó una fase cristalina y a 500 °C se observaron fracturas. A 600 °C se obtuvo un vidrio estable y sin defectos, por lo que se estableció esta temperatura como óptima para el recocido. Por su parte, el análisis termogravimétrico (TGA) no mostró pérdidas de masa, lo cual confirma la estabilidad de la matriz vítrea.

Colorimetría del vidrio

En la Figura 11 se observan las muestras obtenidas de los vidrios sintetizados a partir de CBC con distintos tamaños de partícula y condiciones de tratamiento. La muestra a) corresponde al vidrio producido sin tratamiento de lixiviación previo, el cual presenta una coloración ámbar evidente a simple vista, atribuida a la presencia de óxido de hierro (III) (Fe_2O_3) remanente en la matriz vítrea. Para los vidrios obtenidos a partir de CBC tratada con ácido oxálico [muestras b) a f)], se empleó una concentración del 30% p/p de carbonato de potasio (K_2CO_3) como agente fundente. Esta cantidad resultó adecuada para disminuir la viscosidad del fundido, permitiendo un vaciado más eficiente. Esta formulación se fundamenta en que el contenido de óxido de calcio (CaO), que también actúa como fundente, no fue sustancialmente reducido durante la etapa de lixiviación con ácido oxálico.

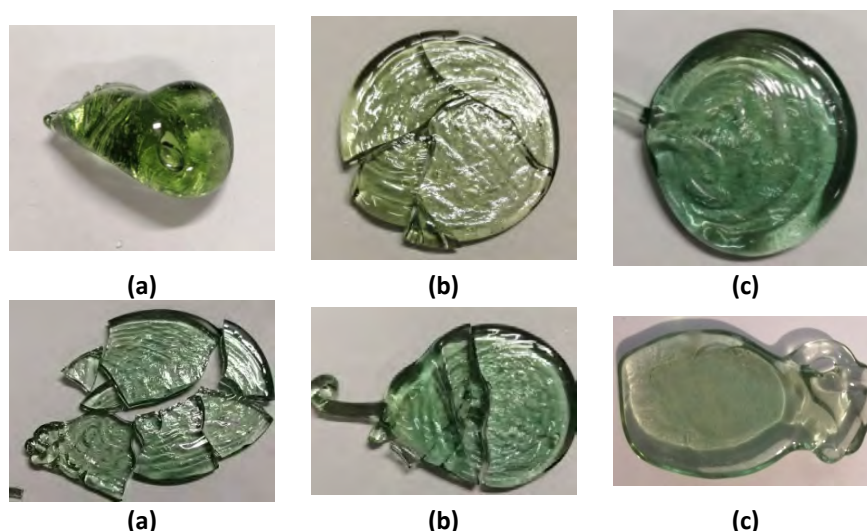


Figura 11. a) Vidrio sin previo tratamiento de lixiviación a la CBC. b) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 100 con 3% de ácido oxálico a 60 °C por 2 h de reacción. c) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 100 con 4% de ácido oxálico a 60 °C por 2 h de reacción. d) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 100 con 3% de ácido oxálico a 60 °C por 6 h de reacción. e) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 100 con 4% de ácido oxálico a 60 °C por 6 h de reacción. f) Vidrio con previa lixiviación a la CBC malla 200 con 4% de ácido oxálico a 60 °C por 2 h de reacción

Algunas muestras presentaron inclusiones sólidas visibles, las cuales podrían corresponder a partículas de dióxido de silicio (SiO_2) no completamente fundidas. Este defecto se atribuye a la necesidad de acortar el tiempo de fusión para ajustarse a las restricciones de operación en el laboratorio. Asimismo, se observaron fracturas en algunas muestras como consecuencia del choque térmico experimentado durante el enfriamiento rápido desde temperaturas de fusión. Para prevenir este efecto, las últimas muestras fueron sometidas a un proceso de recocido cercano a la temperatura

de transición vítrea determinada previamente mediante DTA/TGA. Este tratamiento permitió un enfriamiento lento y controlado, reduciendo los esfuerzos residuales responsables de las fracturas.

En cuanto a la coloración, los vidrios producidos a partir de CBC lixiviada con ácido oxálico mostraron una tonalidad ámbar tenue en muestras tratadas con 3% de concentración, y un color verde claro en aquellas tratadas con 4%. Estos resultados se correlacionan con una reducción del contenido de hierro superior al 75% para la CBC malla No. 100, y hasta un 83% en malla No. 200, alcanzando concentraciones finales tan bajas como 0.24% en peso. No se observaron diferencias significativas en la coloración entre los tiempos de 2 y 6 h para la malla No. 100; sin embargo, sí se evidenció una mayor reducción de color en la malla No. 200, en concordancia con su mayor eficiencia en la remoción de Fe.

La Tabla 3 presenta los resultados del análisis de colorimetría de los vidrios obtenidos, evaluados mediante el sistema CIELab*, con el objetivo de cuantificar de manera objetiva el tono y la luminosidad de las muestras. Para fines comparativos, se utilizaron como referencia los valores colorimétricos de un vidrio comercial transparente, mostrados en la Figura 12, lo que permitió establecer diferencias específicas en parámetros de claridad y matiz entre las formulaciones experimentales y un estándar industrial.

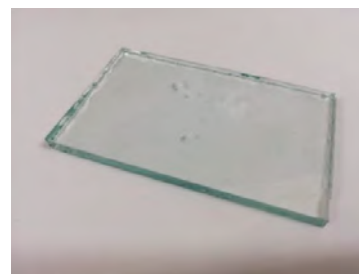


Figura 12. Muestra de vidrio comercial

Tabla 3. Colorimetría de sistema CIELab* para vidrios resultantes

Muestra de vidrio	L*	a*	b*
Comercial	44.11	-1.36	0.88
Sin tratamiento	25.12	-0.47	0.91
3% oxálico, 60°C, 2h, malla 100	42.67	-4.52	6.14
4% oxálico, 60°C, 2h, malla 100	32.16	-3.07	2.28
3% oxálico, 60°C, 6h, malla 100	41.97	-6.1	3.85
4% oxálico, 60°C, 6h, malla 100	36.81	-5.56	3.14
4% oxálico, 60 °C, 2 h, malla 200	28.7	-3.21	2.6

La Tabla 3 muestra diferencias significativas entre el vidrio sin tratamiento y el vidrio comercial, particularmente en el valor de luminancia, donde el vidrio sin tratar presenta un valor de 25.12. En los vidrios obtenidos a partir de CBC tratada, los valores de luminancia aumentan, indicando una mayor transparencia. La interpretación de los parámetros de color se complementa con el diagrama cromático en las Figuras 13 a 15, donde se visualiza el cambio en tonalidad hacia regiones más neutras conforme mejora la remoción de hierro.

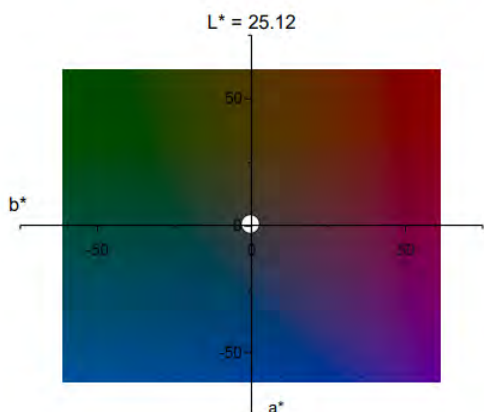


Figura 13. Diagrama cromático para el vidrio con CBC sin previo tratamiento

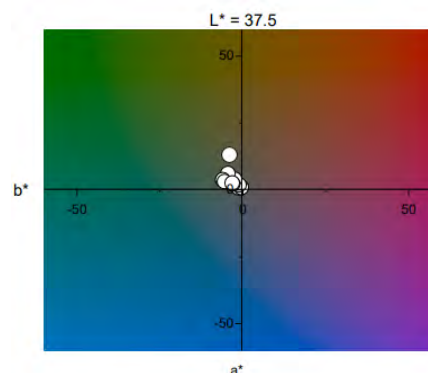


Figura 14. Diagrama cromático para el vidrio con CBC lixiviada

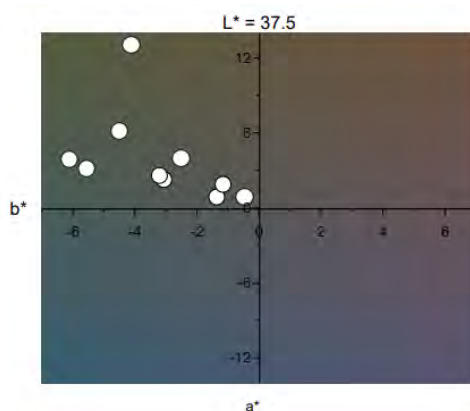


Figura 15. Diagrama cromático para el vidrio con CBC lixiviada

Pruebas mecánicas

Pruebas de flexión

Las pruebas de flexión se realizaron utilizando probetas de vidrio con dimensiones de 49 mm de largo, 10 mm de ancho y 4 mm de alto, empleando una máquina universal (Figura 16). Las muestras fueron elaboradas a partir de CBC previamente lixiviada bajo condiciones óptimas: 4% de ácido oxálico, 60 °C y 2 h de reacción. Para la síntesis, se prepararon lotes de 50 g, empleando una formulación con 30% p/p de carbonato de potasio (K_2CO_3) como agente fundente.



Figura 16. Prueba de flexión de cuatro puntos al inicio de la prueba (izquierda) y después de alcanzar la fuerza máxima (derecha)

La Tabla 4 presenta los resultados de las pruebas de flexión. Para establecer una comparación directa, se prepararon probetas a partir de un vidrio comercial, el cual fue refundido a 1450 °C durante 2 h y vaciado en el mismo molde utilizado para los vidrios experimentales, manteniendo dimensiones equivalentes.

Tabla 4. Resultados de prueba de flexión

Muestra	Resistencia a la flexión (MPa)	Desplazamiento de flexión a fuerza máxima (mm)
Vidrio comercial	25.42	0.133
Vidrio ($C_2H_2O_4$)	24.72	0.132

El vidrio comercial presentó una resistencia a la flexión de 25.4 MPa, mientras que el vidrio sintetizado a partir de CBC lixiviada con ácido oxálico alcanzó un valor de 24.7 MPa, resultado comparable al material de referencia. Asimismo, la deformación máxima antes de la fractura fue de 0.13 mm para ambos casos, lo que indica un comportamiento mecánico similar.

Estos resultados confirman que las condiciones seleccionadas para la lixiviación y síntesis del vidrio no comprometen sus propiedades mecánicas, manteniendo una resistencia a la flexión adecuada en relación con estándares comerciales.

Pruebas de dureza

La Tabla 5 presenta los resultados de las pruebas de dureza realizadas a los vidrios experimentales y al vidrio comercial. Según lo reportado en la literatura, la dureza de los vidrios comerciales se sitúa en un rango de 4.5 a 7 en la escala de Mohs (Moats & Khourabchia, 2009). En este estudio, el vidrio comercial alcanzó una dureza de 7 Mohs, con una dureza absoluta de 100.

En comparación, el vidrio obtenido a partir de CBC tratada con ácido oxálico presentó una dureza de 4 Mohs, correspondiente a una dureza absoluta de 21. Este valor indica que minerales como la apatita (5 Mohs) pueden causar daño a la superficie del vidrio, evidenciando una menor resistencia a la penetración.

Esta diferencia puede atribuirse a una menor proporción de dióxido de silicio (SiO_2) en la estructura del vidrio, en comparación con materiales comerciales. La reducción relativa de óxidos formadores y el aumento de óxidos modificadores genera una red estructural con mayor cantidad de discontinuidades, lo que disminuye la resistencia mecánica del material.

Tabla 5. Resultados de pruebas de dureza

Muestra	Dureza (Mohs)
Vidrio comercial	7
Vidrio ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$)	4

Pruebas de compresión

Las pruebas de compresión se realizaron utilizando probetas cilíndricas con dimensiones de 19.5 mm de longitud y 15 mm de diámetro. La Tabla 6 presenta los resultados obtenidos para las muestras de vidrio comercial y los vidrios experimentales, reportando tanto la fuerza máxima aplicada (en Newtons) como la resistencia a la compresión calculada (en MPa).

Tabla 6. Resultados de pruebas de compresión

Muestra	Fuerza Max (N)	MPa
Vidrio comercial	6114.95	4.8
Vidrio ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$)	8637.07	6.8

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos para los vidrios experimentales se encuentran en el rango de 4.4 a 6.8 MPa, significativamente inferiores a los reportados en la literatura para vidrios comerciales, los cuales suelen presentar resistencias entre 588 y 1100 MPa (Moats & Khourabchia, 2009). Esta discrepancia puede atribuirse a la presencia de burbujas internas en las probetas, las cuales actuaron como puntos de concentración de esfuerzos, favoreciendo la fractura prematura del material. La formación de dichas burbujas se relaciona posiblemente con el uso de crisoles de alúmina durante la síntesis, ya que este tipo de material contiene poros y microgrietas que pueden retener gases. Estos son liberados gradualmente durante el proceso de fusión, generando inclusiones gaseosas en la matriz vítrea.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que la CBC es una materia prima con alto potencial para la síntesis de vidrio, siempre que sea sometida a un proceso de purificación previo. La lixiviación con ácido oxálico al 4%, a 60 °C durante 2 horas, permitió reducir el contenido de hierro (Fe) por debajo del 0.3%, mejorando notablemente la transparencia del vidrio al disminuir la tonalidad ámbar característica de la CBC sin tratar.

La adición de un 30% de carbonato de potasio (K_2CO_3) como fundente fue adecuada para facilitar el vaciado del fundido, compensando la reducción de óxidos modificadores tras la purificación. El vidrio obtenido presentó una estructura amorfa confirmada por DRX, así como una temperatura de transición vítrea (T_g) estimada en 646 °C, valor validado mediante recocido térmico, lo cual permitió evitar fracturas por choque térmico.

Desde el punto de vista óptico, el análisis colorimétrico mostró un aumento en la luminancia y un desplazamiento hacia tonos más neutros, lo que indica una mejora visual significativa en comparación con el vidrio sin tratamiento. Además, las propiedades mecánicas evaluadas —flexión, dureza y compresión— fueron comparables a las del vidrio comercial refundido. La resistencia a la flexión fue de 24.7 MPa y la dureza alcanzó los 4 Mohs. Las bajas resistencias a compresión observadas podrían explicarse por la presencia de burbujas generadas durante la síntesis.

Agradecimientos y financiamiento: Se agradece a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) el respaldo institucional brindado para la realización de este trabajo, así como al personal académico y técnico de la Facultad de Ciencias Químicas por el acompañamiento durante el desarrollo experimental. Asimismo, se reconoce el apoyo del Sistema de Evaluación y Certificación de la Información en Humanidades, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento otorgado a través del programa de becas para estudios de posgrado del Gobierno de México.

Bibliografía

- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2013). *Ciencia e ingeniería de materiales*. CENGAGE Learning.
- ASTM. (1980). *ASTM C 162-80: Definition of terms relating to glass and glass products*.
- Dávalos, J., Bonilla, A., Villalquira-Cañedo, M. A., de Gutiérrez, R. M., & Rincón, J. M. (2020). Preparation of glass-ceramic materials from coal ash and rice husk ash: Microstructural, physical and mechanical properties. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.02.002>
- Fernández Navarro, J. (1991). *El vidrio*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España.
- Moats, M., & Khourabchia, Y. (2009). Effective diffusivity of ferric ions and current efficiency in stagnant synthetic copper electrowinning solutions. *Minerals & Metallurgical Processing*, 26, 179–186. <https://doi.org/10.1007/BF03402537>
- Musgraves, D., Juejun, H., & Laurent, C. (2019). *Springer Handbook of Glass*. Springer Handbooks. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93728-1_50
- Pérez Casas, J. (2018). *Uso de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como fuente de SiO_2 para síntesis de materiales vitrocerámicos con aplicaciones en la construcción* (Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León). <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/18639>
- Rincón, J. M. (2003). Materias primas para la industria del vidrio. *Materiales Vítreos y Cerámicos*, 49–74. https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=SEMINARIO_SEM_2_049.pdf
- Teixeira, S. R., Ferreira, T. F., Souza, A. E., Santos, G. T. A., & Grillo, F. F. (2014). Valorization of sugarcane bagasse ash: Producing glass-ceramic materials. *Journal of Environmental Management*, 134, 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.029>
- Weyl, W. A. (2016). *Coloured Glasses*. Society of Glass Technology.
- Yahya, A. A., Mohamed, M., Azmi, M., & Mahmood, N. (2017). Reducing heavy metal element from coal bottom ash by using citric acid leaching treatment. *MATEC Web of Conferences*, 103, 1–6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710301004>

Análisis de la tarifa GDMTH en industrias manufactureras de calzado en México

Brandon A. Vergara-Cruz, Andrés Salazar-TeXco, Cristian Sarmiento-Gómez, y Mariana Hernández-Escalante *

Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca No. 1009, Ex Hacienda de San Javier, C.P. 43860, Tolcayuca, Hidalgo, México

* Autor de correspondencia: mkhernandez@upmh.edu.mx; Tel.: +52 5569711636

Desarrollo Sustentable (Ahorro de recursos en procesos industriales)

Recibido: 13 de junio de 2025

Aceptado: 26 de julio de 2025

Publicado: 24 de enero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i3.539>

Resumen: La tarifa GDMTH (Gran Demanda en Media Tensión Horaria) es un esquema tarifario aplicado a consumidores industriales con altos niveles de demanda eléctrica en México. El impacto de las tarifas eléctricas en la Industria manufacturera del calzado es relevante, este sector depende de maquinaria especializada e iluminación, factores que influyen en la eficiencia energética del proceso. Se realizó el análisis de la tarifa GDMTH para la industria manufacturera de calzado para una empresa del Estado de Hidalgo, lo anterior a partir de la identificación de la tarifa aplicable, el consumo correspondiente y factor de potencia. En este trabajo se analizaron recibos eléctricos proporcionados por Comisión Federal de Electricidad (CFE), para tener claridad sobre los recargos o bonificaciones. Por sus condiciones actuales, hay un bajo factor de potencia, lo que genera recargos a la empresa mensualmente, además de presentar irregularidades en los cobros de la energía relacionados en función del consumo y otras variables que integran el recibo de facturación. El análisis permitió identificar que el consumo dentro de cualquier planta debe ser preferentemente en el horario base e intermedia, puesto que la energía consumida dentro del horario punta tiene un cargo mayor por cada kilowatt hora en comparación al horario base por el periodo de análisis de diciembre del 2023 a diciembre del 2024.

Palabras clave: GDMTH, factor de potencia, demanda-consumo, bonificación, recargo

Analysis of the GDMTH Tariff in Footwear Manufacturing Industries in Mexico

Abstract: The GDMTH tariff (Great Demand rate in Medium Hourly Voltage) is a tariff scheme applied to industrial consumers with high levels of electricity demand in Mexico. The impact of electricity rates on the footwear manufacturing industry is significant, as this sector depends on specialized machinery and lighting, factors that influence the energy efficiency of the process. An analysis of the GDMTH tariff for the footwear manufacturing industry was conducted for a company in the state of Hidalgo based on the applicable tariff, corresponding consumption, and power factors were identified. This work analyzed electricity bills provided by the Federal Electricity Commission (CFE) to clarify any surcharges or bonuses. Due to current conditions, the company's power factor is low, which generates monthly surcharges. This also presents irregularities in energy bills related to consumption and other variables included in the billing receipt. The analysis identified that consumption within any plant should preferably be during base and intermediate hours, since energy consumed during peak hours carries a higher charge per kilowatt hour compared to base hours for the analysis period from December 2023 to December 2024.

Keywords: GDMTH, power factor, demand-consumption, bonus, surcharge

Introducción

En el contexto industrial actual, la eficiencia energética se ha convertido en parte de un factor determinante para la competitividad y sostenibilidad empresarial (Molina & Molina, 2023). Sin embargo, diversas organizaciones que operan con base a esquemas tarifarios complejos, como la tarifa GDMTH (Gran Demanda en Media Tensión Horaria) perteneciente al esquema tarifario plasmado por la Comisión Federal de Electricidad en México, presentan una problemática recurrente: el desconocimiento profundo de cómo se calcula el costo de la energía que consumen. A pesar de recibir mes con mes su recibo de energía eléctrica, la mayoría de los responsables operativos o administrativos no comprende a detalle la estructura tarifaria ni el significado de cada uno de sus conceptos. Esta falta de comprensión ocasiona problemas al identificar oportunidades de ahorro energético y económico, lo que repercute negativamente en la toma de decisiones estratégicas y en la rentabilidad de la empresa, de igual forma los usuarios desconocen si la cantidad que están pagando por su consumo de energía está en función a los parámetros que CFE marca para el cobro de esta, de acuerdo con sus cargos aplicables mostrados en la plataforma dentro del apartado de esquema tarifario vigente (Cervantes-Jiménez & Minian Ruiz, 2024).

Esta situación se inserta en un contexto más amplio en el que las industrias deben hacer frente a retos globales relacionados con el uso eficiente de los recursos energéticos, la reducción de emisiones contaminantes y la necesidad de cumplir con normativas cada vez más exigentes en materia de sostenibilidad. En este escenario, el entendimiento de las tarifas eléctricas deja de ser un asunto técnico secundario y se convierte en una herramienta clave para la gestión operativa, financiera y ambiental. La Agencia Internacional de Energía (IEA, 2022) ha destacado que las empresas que incorporan estrategias de eficiencia energética basadas en información precisa y análisis de las facturas de energía pueden lograr reducciones sustanciales en su consumo y costos, a la vez que mejoran su desempeño ambiental. En países como México, donde el modelo tarifario ha sido diseñado para reflejar los costos reales del servicio eléctrico, incluyendo generación, transmisión y demanda, el desconocimiento de estos factores puede derivar en pagos innecesarios, recargos evitables o estrategias ineficaces de ahorro.

El consumo y la disponibilidad de la energía son factores importantes para mantener los niveles de producción de cualquier industria. Almeida & Colmenárez (2019) sostienen que lo anterior se pone de manifiesto en el sector manufacturero, además la necesidad de realizar una cuidadosa gestión de la energía para aumentar la competitividad, la cual aplica también para la empresa de calzado analizada. Actualmente la demanda y consumo de energía han sido afectados por diversos factores, según el PRODESEN 2023-2027 se debe principalmente al crecimiento económico, crecimiento poblacional, precio de los combustibles, precio de la energía eléctrica, pérdidas de la energía eléctrica, eficiencia energética entre otros. El consumo de energía para la región central en 2022 alcanzó los 58,099 GWh que representa el 18.1 % del consumo nacional (SENER, 2022), en la Figura 1 se puede observar que el municipio de San Agustín Tlaxiaca tiene una participación de 22,846.505 MWh en el consumo de energía para la industria conectada en Media Tensión.

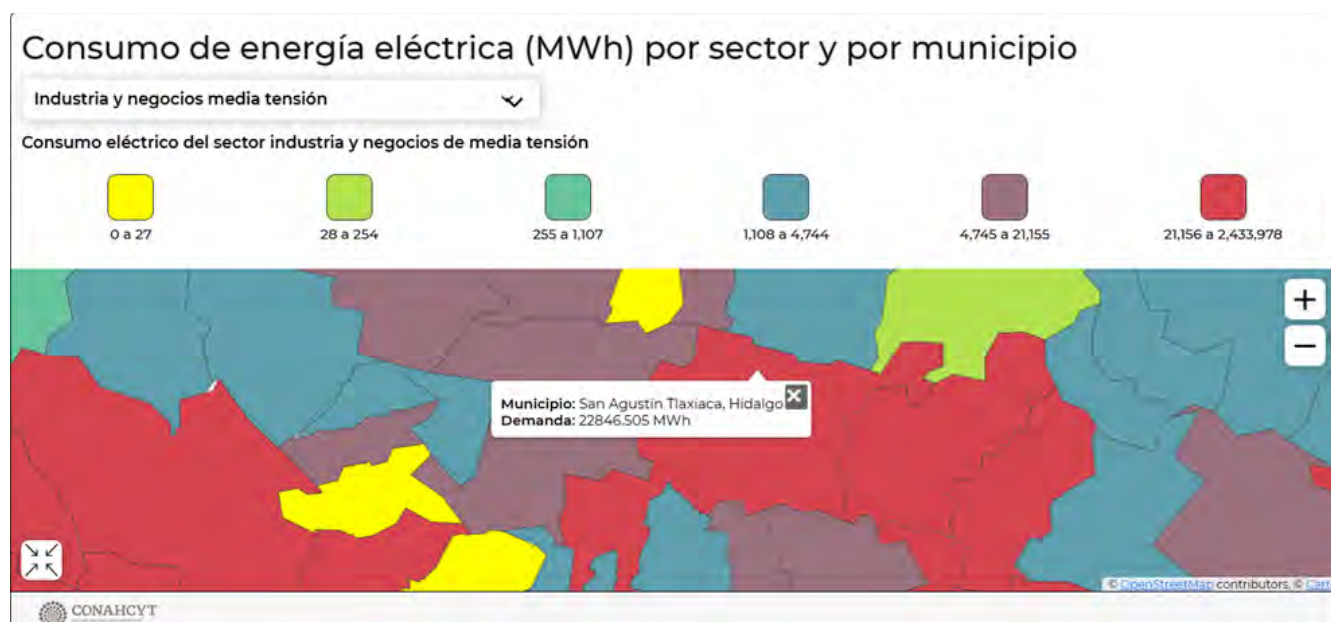


Figura 1. Consumo de energía en San Agustín Tlaxiaca. Fuente: (CEFa, s.f)

Como se mencionó anteriormente el consumo de energía aumenta en función de diferentes factores, las cuales pueden ser mitigadas aplicando medidas de eficiencia energética, en este sentido los sistemas de gestión son una forma de identificar los factores que afectan en el consumo excesivo de energía. Los sistemas de gestión de la energía tipo ISO-50001 en la Etapa 2 “Evaluar el Desempeño Energético” (CONUEE, 2016) y de los principales aspectos de la evaluación del desempeño energético es el análisis de datos energéticos, que se refiere a datos de consumo de energía y el análisis de los recibos de facturación. Estos sistemas forman la base para sustentar este trabajo, ya que permite aplicar medidas de eficiencia energética una vez analizadas las entradas y salidas de energía eléctrica, sin embargo, no se especifica sobre la interpretación de la estructura tarifaria en la que se encuentran los diferentes usuarios finales, el entendimiento de la estructura tarifaria permite identificar posibles soluciones sin la necesidad de realizar acciones específicas como visitas a la organización o mediciones exhaustivas.

Numerosos estudios han demostrado que el análisis detallado de los recibos de energía y la implementación de acciones correctivas pueden traducirse en ahorros significativos (Martín-Canché *et al.*, 2024; Cuevas Muñoz *et al.*, s.f.; Gutiérrez-Villegas, Vejar-Ruiz & Escamilla-Martínez, 2021; Hernández Martínez, Barrera Valdés, & Jurado Pérez, 2018), sin embargo, fueron estudios donde la tarifa estuvo presente, pero el objetivo del estudio no se centraba en la metodología de cobro. Por otro lado, Bautista Almánzar (2020) señala que la compensación de energía reactiva permite disminuir los recargos por bajo factor de potencia, una de las principales causas de penalización en el esquema GDMTH. No obstante, estas soluciones suelen ser aplicadas por empresas proveedoras de servicios que no siempre capacitan al usuario final, generando una dependencia tecnológica e informativa de la empresa suministradora, lo que ocasiona que reduzca la capacidad de análisis interno y detallado dentro de las empresas que adquieran estos equipos o servicios. Limitando así la posibilidad de evaluar con criterios propios si las inversiones realizadas en eficiencia energética están generando los beneficios esperados (Cervantes-Jiménez & Minian Ruiz, 2024).

Frente a este panorama, el presente estudio se plantea como una herramienta técnica y práctica que tiene como objetivo principal desglosar la estructura de la tarifa GDMTH, identificar sus componentes clave y ofrecer recomendaciones aplicables para su optimización. El enfoque no se limita a la simple lectura del recibo, sino que busca empoderar al usuario industrial con conocimientos que le permitan interpretar los datos contenidos en la factura, relacionarlos con sus operaciones internas y tomar decisiones informadas que se reflejen en beneficios económicos tangibles. Esta propuesta responde a la necesidad de reducir la brecha de conocimiento técnico que actualmente limita la gestión energética eficiente en muchos sectores productivos.

Las aportaciones principales de este trabajo consisten en proporcionar una guía clara y comprensible sobre el funcionamiento de la tarifa GDMTH, identificar las variables críticas que afectan el importe final del recibo y proponer buenas prácticas que permitan disminuir el costo de la energía mediante una mejor administración de la demanda y del consumo. Asimismo, se ofrece un modelo básico de evaluación económica que facilita la cuantificación del impacto de ciertas decisiones operativas, como la programación de cargas, la corrección del factor de potencia o la modificación de horarios de operación. Se espera que el uso de esta herramienta contribuya a una mayor autonomía de las empresas en la gestión de su energía y a una reducción sostenida de sus costos.

Materiales y Métodos

Con el fin de realizar un análisis personalizado, se desarrolló una metodología basada en la construcción de fórmulas específicas a partir de datos reales. Esta metodología integró dos fuentes principales de información: los datos proporcionados por la CFE y los datos particulares de cada usuario. Los datos obtenidos de la CFE se incluyeron el desglose de las cuotas aplicables (con base en el concepto de energía). Por otro lado, los datos específicos del usuario comprenden características operativas, patrones de consumo, ubicación geográfica, tipo de contrato, y horarios de operación, entre otros. A partir de esta información se diseñaron fórmulas matemáticas que permiten interpretar el comportamiento del recibo de cada usuario. Esta aproximación no solo facilita la identificación de oportunidades de ahorro y eficiencia, sino que también permite simular el impacto económico de posibles modificaciones en la operación o en la infraestructura energética del usuario.

Descripción de la tarifa contratada

Para poder realizar cualquier análisis primero fue necesario conocer el detalle de la tarifa contratada. La empresa que se analizó cuenta con un contrato en tarifa GDMTH, que significa Gran Demanda Media Tensión Horaria. Esta tarifa se aplica a los servicios generales en media tensión, con demanda de 100 kW o más. Se considera media tensión cuando el cliente recibe su energía eléctrica entre 1,000 y 35,000 V. La característica principal de la tarifa GDMTH es que es horaria, es decir, que el costo de la unidad energética es diferente según la hora del día y el día de la semana (CFEb, 2025). Entonces, el precio de cada kWh depende de la hora en que se ocupe la energía y del día en que es consumido, de esta manera se tienen los períodos u horarios denominados de punta, intermedia y base.

Además de la energía consumida, en esta tarifa también se cobra la demanda máxima que consiste en el máximo valor promedio de 15 minutos del período de consumo. La demanda máxima se mide en cada período y a partir de esos valores se calcula la capacidad y distribución, que es la que se cobra. La tarifa GDMTH también es regional, es decir, según la zona del país presenta diferentes valores. En San Agustín Tlaxiaca aplica la región Centro Oriente.

Los horarios de los periodos punta base e intermedia, según la época del año, se dan en la Figura 2.

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00
sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00
domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

Figura 2. Distribución de horas de base, intermedia y punta para la Región Central (CFEb, 2025)

La información de distribución de horas fue crucial para la elaboración del diagnóstico e interpretación de resultados que se mencionan más adelante.

Base de datos de usuario y estructura del recibo de CFE

Una vez identificado la tarifa en la cual se encuentra la empresa y sus características específicas se procede a generar una base de datos para poder realizar el análisis de los recibos de los conceptos que la componen. Además, para llevar un control detallado y eficiente del comportamiento energético, se registraron los principales indicadores de consumo y facturación eléctrica de la empresa (usuario). Esta base de datos permitió analizar tendencias, identificar oportunidades de mejora y optimizar los costos asociados al uso de la energía, los criterios que contiene la base de datos del usuario son los siguientes:

- A. Ubicación: consiste en la recapitulación del estado y municipio del usuario.
- B. Periodo: se refiere al año y mes del recibo a analizar.
- C. Consumo Base: Energía consumida durante el periodo de menor demanda.
- D. Consumo Intermedio: Energía consumida durante los horarios de demanda media.
- E. Consumo Punta: Energía consumida en los horarios de mayor demanda.
- F. Demanda Punta: Potencia máxima requerida durante los periodos de punta.
- G. Demanda Máxima: Máxima potencia registrada en cualquier momento del periodo.
- H. Factor de Potencia: Relación entre la potencia activa y la potencia aparente, indicador clave para evaluar la eficiencia energética.
- I. Importe por Energía: Costo total asociado al consumo de energía eléctrica y los conceptos de capacidad y distribución que hacen referencia a la demanda de energía.
- J. Cargo por Factor de Potencia: recargo por penalización económica aplicada cuando el factor de potencia es inferior al requerido por la compañía suministradora.
- K. Derecho de alumbrado público: cargo adicional que aparece en los recibos de energía eléctrica, consiste en un monto el cual cobra el municipio con el fin de financiar el alumbrado público en calles.
- L. Importe total a pagar: representa la cantidad de dinero correspondiente a todos los importes que se presentan en el recibo de facturación.

Para realizar el cálculo de las variables descritas con anterioridad se deben consultar en las cuotas aplicables para cada periodo de facturación y conocer la estructura del recibo eléctrico. En la Figura 3 se muestra una imagen del portal CFE el cual se siguió la ruta NEGOCIO-TARIFAS-GDMTH y se consultaron los cargos correspondientes al concepto de energía, los cuales fueron fundamentales para el análisis detallado de la estructura tarifaria y la facturación del servicio eléctrico. Entre los cargos a registrar se encuentran: Cargo fijo, Cargo del horario base, Cargo del horario intermedia, Cargo del

horario punta, Cargo por distribución y Cargo por Capacidad. Para contextualizar adecuadamente esta información y garantizar su correcta interpretación, también fue necesario registrar el estado y municipio donde se encuentra cada punto de suministro, además del año y el mes que pertenecen al recibo de análisis, ya que estos cargos pueden variar dependiendo de la ubicación geográfica y el periodo aplicable, el mes a utilizar correspondiente al periodo aplicable, debe de ser el segundo mes marcado del periodo facturado.

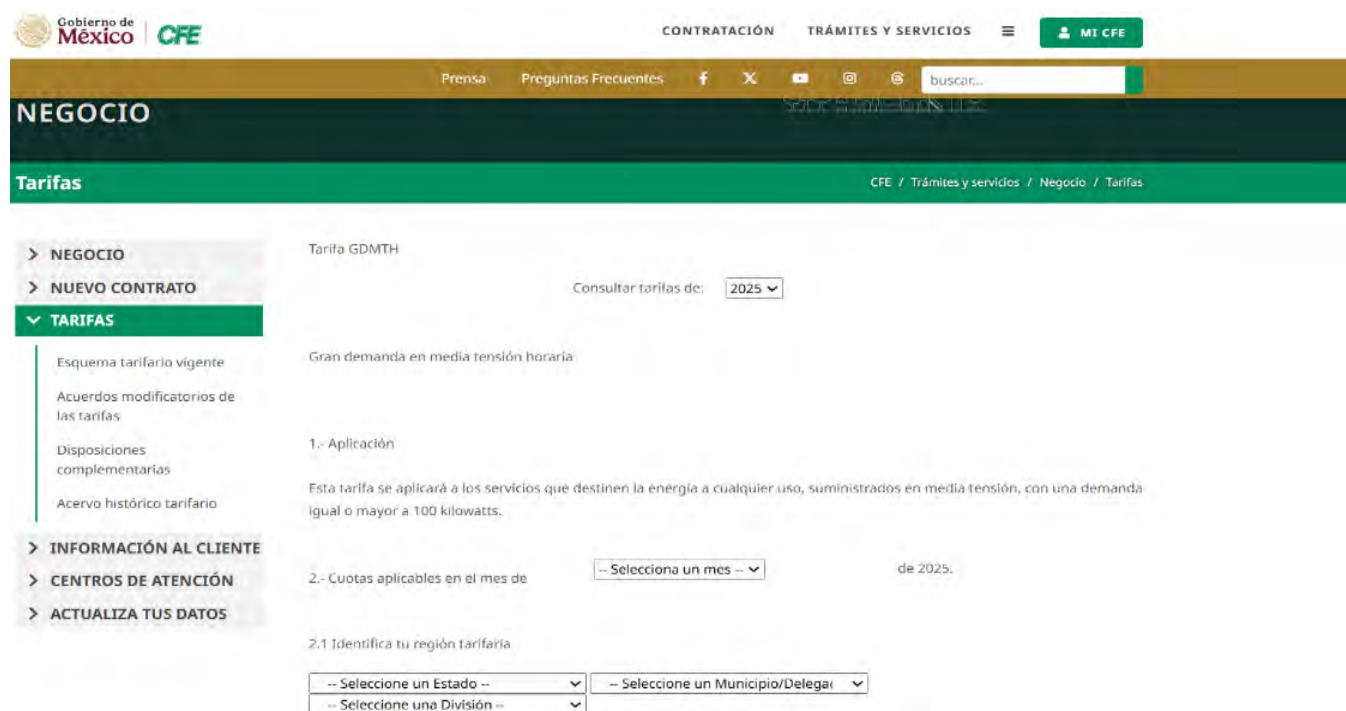


Figura 3. Plataforma CFE, Negocios-Tarifas-GDMTH (CFEb, 2025)

Ecuaciones para validación de costos asociados al concepto de energía y factor de potencia

Una vez conocida la información de los conceptos que la CFE aplica en los recibos de la empresa y de la información extraída de la página oficial, fue necesario realizar un recalcu para verificar si la CFE está realizando el cobro de forma correcta o si existe alguna discrepancia.

Recálculo del concepto de energía

Para iniciar el diagnóstico, fue necesario recalcular el concepto de energía, con el fin de verificar que los cobros realizados a la empresa y verificar que se encuentren alineados con los requerimientos establecidos por la CFE. El concepto de energía se re-calculó usando la fórmula 1 con base en los cargos obtenidos a través del portal de CFE en el apartado de Negocios-Tarifas-GDMTH (CFE, 2025), cada concepto maneja una relación con el recibo, los cargos por consumo se multiplican directamente por el consumo (base, intermedia y punta) del horario en el recibo que se está analizando. El cargo por capacidad y distribución se aplicó con base en el criterio G mencionado anteriormente llamado Demanda Máxima para el cobro por capacidad y distribución de la misma página la cual hace referencia al cálculo de la capacidad y distribución (CFE, 2025).

$$Enr = (ChB * QhB) + (ChI * QhI) + (ChP * QhP) + \left\{ CD * \text{Min} \left(DMAX \text{ mensual}, \left[\frac{Q \text{ mensual}}{24 * d * FC} \right] \right) \right\} + \left\{ CC * \text{Min} \left(DMAX \text{ punta}, \left[\frac{Q \text{ mensual}}{24 * d * FC} \right] \right) \right\} \quad (1)$$

Donde: ChB = Cargo del horario base (\$/kWh); QhB = Consumo en horario base (kWh); ChI = Cargo del horario Intermedia (\$/kWh); QhI = Consumo del horario Intermedia (kWh); ChP = Cargo del horario punta (\$/kWh); QhP = Consumo del horario punta (kWh); CD = Cargo por distribución (\$/kW); CC = Cargo por capacidad (\$/kW); $Q \text{ mensual}$ = Consumo mensual (kWh); $DMAX \text{ mensual}$ = Demanda máxima mensual (kW); $DMAX \text{ punta}$ = Demanda máxima del horario punta (kW); Min = Mínimo; 24= 24 horas; d = Cantidad de días del periodo facturado; FC = Factor de carga.

La capacidad y distribución hace alusión a la demanda máxima medida y CFE la define como máxima en distintos periodos de facturación. Estos datos CFE los mide mensualmente por medio de instrumentos de medición, que indican la demanda media en kilowatts, durante cualquier intervalo de 15 minutos del periodo en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro intervalo de 15 minutos en el periodo correspondiente, cualquier fracción de kilowatt de demanda medida se tomará como kilowatt completo (CFE, 2025). Es decir, considera la forma en que se utiliza la energía durante todo el día, sin embargo, dentro del criterio para realizar el cobro para capacidad y distribución aparece el término siguiente, el cual se muestra en la Ecuación 2 que es un extracto de la Ecuación 1:

$$\left[\frac{Q \text{ mensual}}{24 * d * FC} \right] \quad (2)$$

Dicho término permite a los usuarios implementar estrategias para el uso racional de la energía para disminuir la $Q \text{ mensual}$ y forzar que la Ecuación 2. sea menor a la medida por CFE y realizar un pago menor por capacidad y distribución.

Una vez calculado el concepto de energía, se consideró el mismo concepto del recibo de energía y se le restó el concepto de energía recién calculado como se muestra en la fórmula 2, en caso de ser 0 el resultado quiere decir que lo que te está cobrando CFE por este concepto corresponde a lo que debe ser cobrado con base en sus parámetros mostrados en el portal, sin embargo si el resultado es negativo quiere decir que se está cobrando menos dinero del que debería ser cobrado, en caso de ser positivo indica que se está cobrando más dinero a el usuario por el concepto de energía.

$$\Delta Enr = Enr \text{ recibo} - Enr \text{ calculada} \quad (3)$$

Re-cálculo del recargo o bonificación por factor de potencia

Para re-calcular el recargo con base en el factor de potencia se tomaron como referencia las fórmulas que dicta CFE, para los recargos de la Ecuación 4, o para las bonificaciones, la Ecuación 5 según sea el caso, de parte del usuario se toma del recibo el factor de potencia que se presenta en una escala del 0 al 100, según lo que menciona (CFE,2025). Los valores resultantes de la aplicación de estas fórmulas se redondearon a un solo decimal, según sea o no menor que 5 (cinco) el segundo decimal, además de que ningún recargo supere el 120% ni ninguna bonificación el 2.5%. Para poder aplicar este porcentaje de recargo o bonificación se multiplicó por los conceptos de cargo fijo y Energía como se muestra en la Ecuación 6.

$$\text{Porcentaje de Recargo} = 3/5 * ((90 / FP) - 1) * 100 \quad (4)$$

$$\text{Porcentaje de Bonificación} = 1/4 * (1 - (90 / FP)) * 100 \quad (5)$$

$$(RFP, BFP) \text{ Calculado} = (RFP\%, BFP\%) * (Enr \text{ Calculado} + Cfj) \quad (6)$$

Donde: FP= Factor de potencia.

Una vez obtenida la cantidad a pagar según sea el caso de recargo o bonificación se dio a conocer si el valor que muestra en el recibo corresponde a lo que se debería cobrar, como se observa en la Ecuación 7 para el caso del recargo se tuvo que restar el monto calculado a el monto mostrado en el recibo, el resultado debe ser 0, en caso de ser positivo se entiende que el monto mostrado en el recibo es mayor al que debería ser y en caso de ser negativo se entiende que es menor al que debería.

$$\Delta RFP = RFP \text{ recibo} - RFP \text{ Calculado} \quad (7)$$

En caso exclusivo de la bonificación se sabe que el monto se debe restar, puesto que la bonificación comprende una cantidad negativa, o dicho de otras palabras una cantidad de ahorro, por lo tanto si el valor de bonificación es negativa se debe tomar los valores absolutos del recibo y el calculado, para posteriormente ser restado el valor calculado al del

recibo como se muestra en la Ecuación 8, en caso de ser el resultado negativo, este indicará que el importe de bonificación mostrado en el recibo es menor de lo que debería ser, en caso de ser positivo el importe de bonificación es mayor de lo que debería ser.

$$\Delta BFP = |BFP \text{ recibo}| - |BFP \text{ Calculado}| \quad (8)$$

Re-cálculo del IVA

El Impuesto Sobre Valor Añadido del recibo debió ser calculado según sea el caso previo, usando la Ecuación 9 para el caso de recargo o la Ecuación 9 para el caso de bonificación.

$$IVA = 0.16 * (Enr + RFP \text{ Calculado} + Cfj) \quad (9)$$

$$IVA = 0.16 * (Enr - BFP \text{ Calculado} + Cfj) \quad (10)$$

Para identificar irregularidades, se tuvieron que implementar las ecuaciones 11 o 12 según sea el caso de estudio. En cualquiera de los dos casos si el resultado es menor, el IVA que está plasmado en el recibo es menor que el que debería ser cobrado, y en caso de ser positivo, el IVA plasmado en el recibo es mayor que el que debería ser cobrado.

$$\Delta IVA \text{ Recargo} = IVA \text{ Recargo del Recibo} - IVA \text{ de Recargo Calculado} \quad (11)$$

$$\Delta IVA \text{ Bonificación} = IVA \text{ Bonificación del Recibo} - IVA \text{ bonificación Calculada} \quad (12)$$

Recálculo del importe total del recibo

El concepto de importe total se Re-calculó como se muestra en la Ecuación 13, la Ecuación está conformada por todos los conceptos previos que han sido calculados (Energía, Recargo o Bonificación y IVA) a estos conceptos calculados previamente se le sumaron el cargo fijo y el cargo por el derecho de alumbrado público, el cual se retoma del recibo de energía del usuario.

$$IT \text{ calculado} = Cfj + Enr \text{ calculado} + (BFP, RFP) \text{ calculado} + IVA \text{ calculado} + CPDAP \quad (13)$$

Para saber si existe una discrepancia o irregularidad al Importe total del recibo se le restó el importe total calculado como se muestra en la Ecuación 14 y en caso de ser negativo quiere decir que el importe total plasmado en el recibo es menor que el calculado, en caso contrario donde el resultado sea positivo el importe total del recibo es mayor que el calculado.

$$\Delta IT = IT \text{ Recibo} - IT \text{ Calculado} \quad (14)$$

En los casos de resultados Negativos indicaron que la empresa suministradora del servicio ha plasmado un importe menor al que debería, indicando que cobró dinero de menos, por otro lado, en caso de ser positivo indicará que la empresa suministradora del servicio ha cobrado dinero de más.

Comparativa de recibos CFE Vs. Resultados de recálculo

Una vez realizado los recalculos de todos los conceptos que integran el cobro de un recibo emitido por la CFE para la empresa se procede a realizar una comparativa del total a pagar con lo que arrojan las ecuaciones y determinar si existen discrepancias en algún periodo de facturación o si los cobros fueron realizados de forma adecuada. A partir de esta información se procede a emitir recomendaciones a la empresa suministradora en el caso de que existiera una discrepancia, sin embargo, con la información ya deslazada se pueden observar otros parámetros que son importantes modificar ya que impactan en el cobro del importe total, por ejemplo, el factor de potencia.

Resultados y Discusión

Conocer y analizar los conceptos incluidos en un recibo eléctrico es fundamental para asegurar que los cobros realizados sean correctos y justificados. Entre estos conceptos, uno de los que puede generar cargos adicionales es el recargo por bajo factor de potencia, este mismo se relaciona con la eficiencia en el uso de la energía, y cuando se encuentra por debajo de ciertos valores, se aplican penalizaciones reflejadas como recargos a los conceptos de cargo fijo y energía reflejados en el recibo. Aunque estos montos pueden ser relativamente pequeños comparados con el consumo de energía activa, es importante verificar que se calculen correctamente el cual, aunque no suele representar el mayor porcentaje del importe total, sí puede influir en el costo final de manera acumulativa si no se supervisa adecuadamente.

Además del factor de potencia, existen otros elementos en el recibo que pueden presentar inconsistencias o errores, como el consumo de energía, la aplicación del IVA, o el cálculo del importe total. Por esta razón, realizar un recálculo independiente con base en fórmulas técnicas permite identificar posibles irregularidades en la facturación, como cargos mal aplicados, errores de medición o redondeos inadecuados. La detección de estas irregularidades no solo ayuda a corregir errores que podrían afectar el gasto mensual, sino que también brinda al usuario mayor control y comprensión sobre su consumo y los cargos que se le facturan.

Pasos para consultar los cargos asociados a el concepto de energía

Entrar a el portal de CFE como se muestra en la Figura 4 y una vez ahí, se debe de dirigir a la sección de negocios, en donde se debe desglosar las secciones disponibles, seleccionar Tarifas y dirigirse a la sección GDMTH, una vez ahí se debe colocar el periodo pertinente (año y mes) y la región, incluyendo; estado, municipio y división.

2.- Cuotas aplicables en el mes de **DICIEMBRE** de 2023.

2.1 Identifica tu región tarifaria

HIDALGO	-- Seleccione un Municipio --
-- Seleccione un División --	

Centro Oriente

Tarifa	Descripción	Int. Horario	Cargo	Unidades	DIC-23
GDMTH	Gran demanda en media tensión horaria	-	Fijo	\$/mes	329.51
		Base	Variable (Energía)	\$/kWh	1.0593
		Intermedia	Variable (Energía)	\$/kWh	1.9013
		Punta	Variable (Energía)	\$/kWh	2.1472
		-	Distribución	\$/kW	154.72
		-	Capacidad	\$/kW	395.24

Figura 4. Plataforma CFE, Negocios-Tarifas-GDMTH-Ejemplo de cargos aplicables al concepto de energía

Factor de potencia

Para la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía el factor de potencia es considerado como un indicador para el correcto aprovechamiento de la energía y esta toma un valor entre 0 y 1, siendo 1 el valor ideal que representa , debido a que el valor de 1 indica que la energía se aprovecha al 100% transformándola en el trabajo respectivo de cada equipo, sin embargo, un número menor a 1 indica que se requiere más energía para que el aparato en cuestión haga el mismo trabajo útil (Gobierno de México, 2014). Tanto CFE como el Gobierno de México mencionan que el uso

aceptable para la energía conforme el factor de potencia no debe bajar de 0.9, en caso de ser superior a 0.9, estos porcentajes de bonificación y recargo son calculados con las fórmulas 4 y 5. En la Figura 5 se muestra la variación del factor de potencia representado en porcentaje.

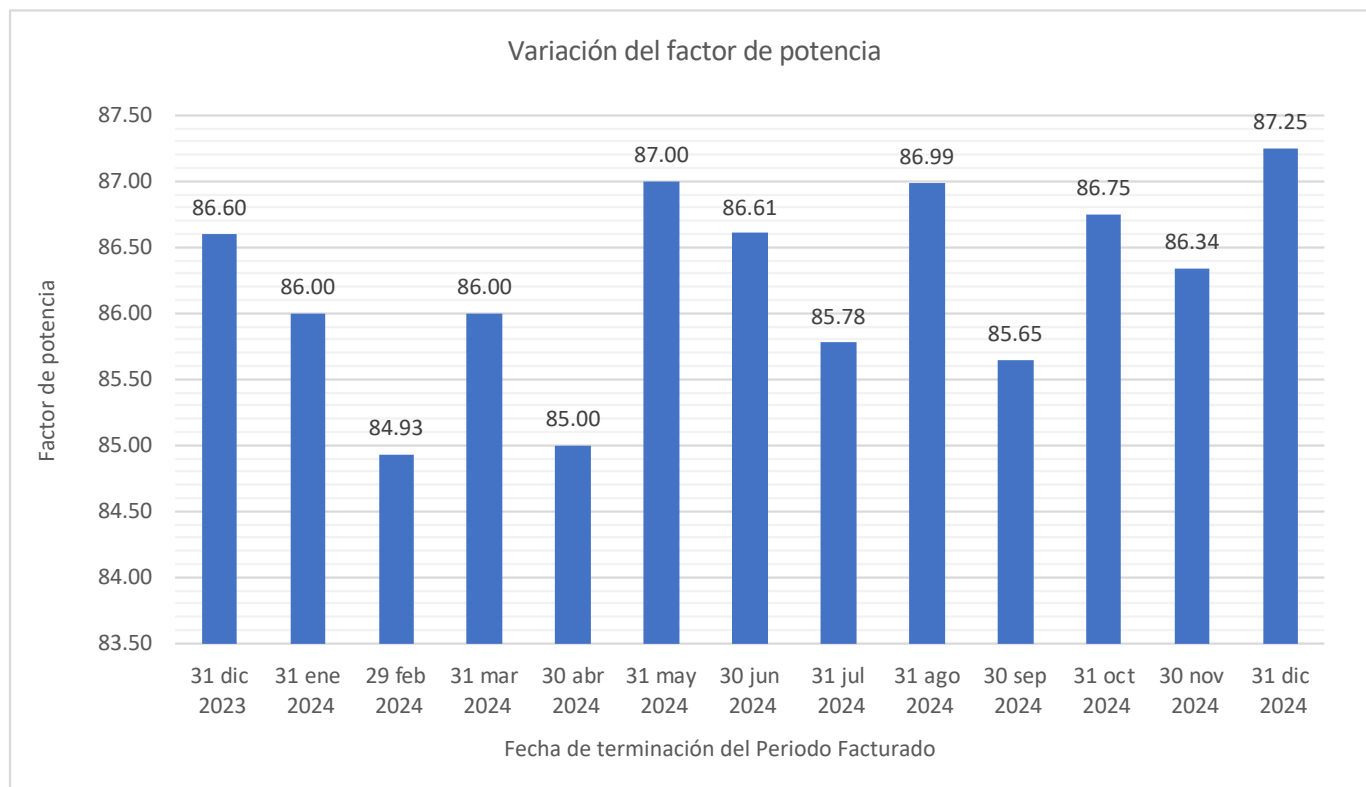


Figura 5. Variación del factor de potencia

El mes de diciembre del 2024 presenta el mayor factor de potencia correspondiente a un 12.75% por debajo del 100% o un 2.75% por debajo del 90% requerido, a diferencia del mes de febrero el cual tiene el menor factor de potencia siendo este de un 15.07% por debajo del 100% o un 5.07% por debajo del 90% requerido, los dos meses presentan un factor de potencia bajos, esto indica que conlleva a recargos, lo que a su vez son montos importantes a satisfacer, en ningún momento dentro de la figura se observa que el factor de potencia suba a 90 o un valor superior, por lo tanto durante esos 13 meses en ningún momento se aplicaron bonificaciones.

Recargos por bajo factor de potencia

La relevancia de esta observación radica en el costo económico que representa mantener un factor de potencia deficiente. En promedio, se estima una pérdida mensual cercana a los +\$7,784 MXN mes⁻¹, únicamente por concepto de recargos. Esta cifra, aunque aparentemente discreta de forma individual, adquiere un peso significativo al considerar su efecto acumulado en un periodo prolongado.

La Figura 6 presenta de manera clara la variación mensual de los recargos por bajo factor de potencia, destacando especialmente los meses de febrero y abril como los más representativos en cuanto a impacto económico negativo. Estos dos meses coinciden con los registros más bajos en el factor de potencia, lo que refuerza la relación directa entre una baja eficiencia en el uso de la energía eléctrica y el incremento en los cargos adicionales por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Al analizar los 13 meses comprendidos en el estudio, se identifica que el monto total de pérdidas por recargos asciende a +\$101,194 pesos MXN por el periodo de análisis, lo que representa una cantidad considerable para cualquier empresa, sobre todo en sectores donde el control de costos energéticos es clave para mantener la competitividad.

Cabe recalcar que este indicador es potencial, pues a través de este se conoce la cantidad posible de ahorro al corregir el factor de potencia, cabe recalcar que si se corrige el factor de potencia y aun así sobre pasa el 0.9 se podrán obtener bonificaciones, por lo que el monto a ahorrar tiene una alta posibilidad de aumentar según sea el caso.

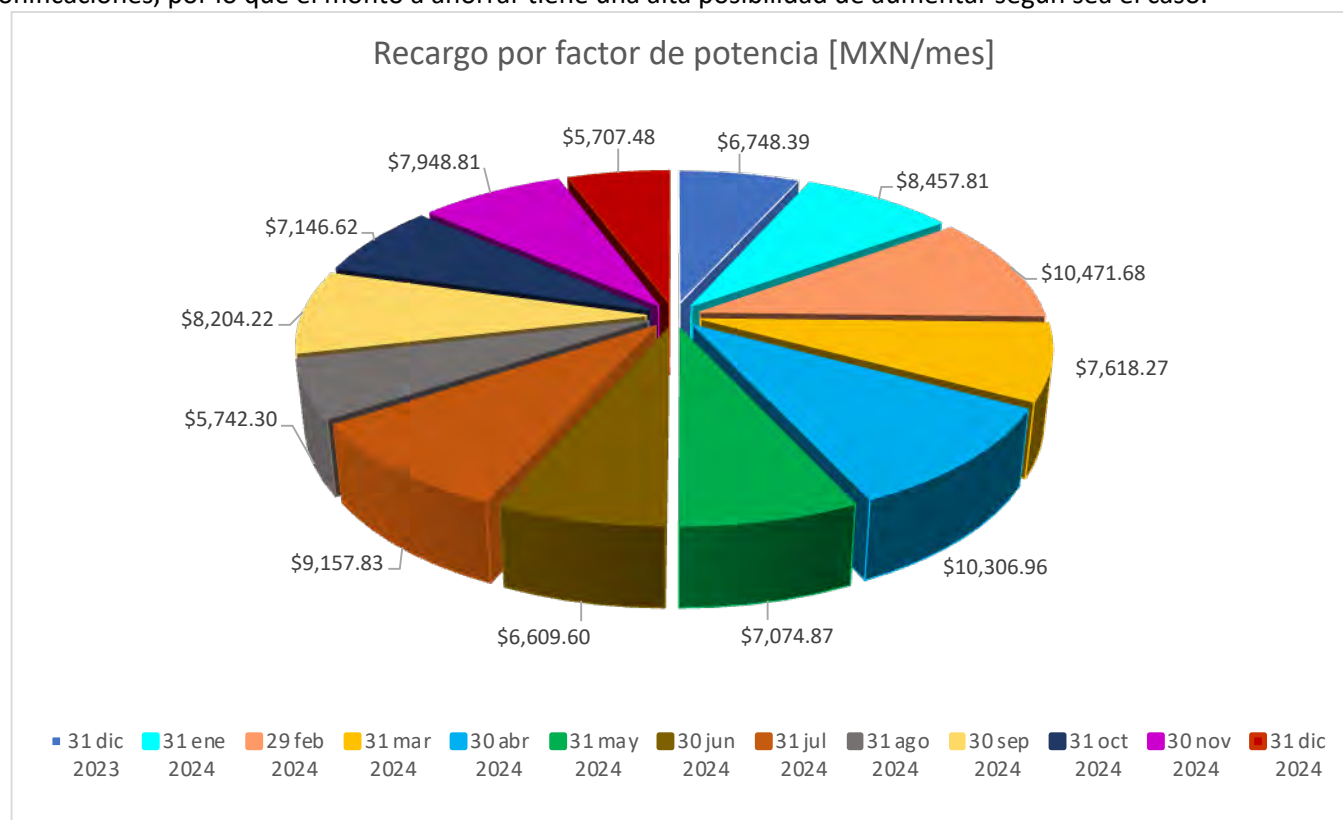


Figura 6. indicador potencial de ahorro económico con base en el factor de potencia

Información recapitulada de los Recibos

A continuación, se presenta la Tabla 1, la cual muestra el conjunto de datos correspondientes a un recibo de energía. En ella se detallan los valores registrados para cada periodo mensual, incluyendo el monto a pagar por el concepto de energía, el recargo a pagar por factor de potencia, el IVA aplicado y el importe total facturado.

Tabla 1. Conjunto de cargos del recibo

Periodo	Energía [MXN mes ⁻¹]	Recargo por factor de potencia [MXN mes ⁻¹]	IVA [MXN mes ⁻¹]	Importe total [MXN mes ⁻¹]
31 dic 2023	\$280,853	\$6,748	\$46,069	\$338,319
31 ene 2024	\$301,705	\$8,458	\$49,684	\$364,864
29 feb 2024	\$290,520	\$10,472	\$48,216	\$354,088
31 mar 2024	\$292,650	\$7,618	\$48,101	\$353,239
30 abr 2024	\$297,340	\$10,307	\$49,281	\$361,909
31 may 2024	\$307,243	\$7,075	\$50,348	\$369,747
30 jun 2024	\$287,014	\$6,610	\$47,037	\$345,431
31 jul 2024	\$304,901	\$9,158	\$50,307	\$369,443
31 ago 2024	\$273,083	\$5,742	\$44,670	\$328,043
30 sep 2024	\$273,114	\$8,204	\$45,069	\$330,972
31 oct 2024	\$312,660	\$7,147	\$51,227	\$376,196
30 nov 2024	\$317,593	\$7,949	\$52,144	\$382,935
31 dic 2024	\$300,033	\$5,707	\$48,976	\$359,670

Esta información es útil para analizar el comportamiento del consumo y los costos asociados a lo largo del tiempo, con esta misma se puede contextualizar al usuario sobre cómo está distribuido el importe que paga de acuerdo con cada concepto facturado en el recibo y así comprender cómo se comporta la facturación a través del periodo de análisis.

Re-cálculo de los conceptos de Energía, Recargo por factor de potencia, IVA e Importe total del recibo

La Tabla 2 presenta un re-cálculo detallado de los importes correspondientes al recibo de consumo eléctrico, con el propósito principal de identificar posibles irregularidades o discrepancias en los montos cobrados por la compañía suministradora. Este ejercicio se llevó a cabo a partir de la aplicación de un conjunto de fórmulas previamente definidas las cuales permiten calcular con mayor precisión cada uno de los conceptos facturados.

Tabla 2. Conjunto de cargos calculados a partir de la información del recibo

Periodo	Energía [MXN mes ⁻¹]	Recargo por factor de potencia [MXN mes ⁻¹]	IVA [MXN mes ⁻¹]	Importe total [MXN mes ⁻¹]
31 dic 2023	\$280,853	\$6,748	\$46,069	\$338,319
31 ene 2024	\$301,705	\$8,458	\$49,684	\$364,864
29 feb 2024	\$290,520	\$10,472	\$48,216	\$354,088
31 mar 2024	\$292,650	\$8,204	\$48,194	\$353,918
30 abr 2024	\$297,239	\$10,416	\$49,282	\$361,918
31 may 2024	\$307,243	\$6,460	\$50,250	\$369,033
30 jun 2024	\$287,014	\$6,610	\$47,037	\$345,431
31 jul 2024	\$304,901	\$9,158	\$50,307	\$369,442
31 ago 2024	\$273,083	\$5,742	\$44,670	\$328,043
30 sep 2024	\$273,114	\$8,204	\$45,069	\$330,972
31 oct 2024	\$311,002	\$7,161	\$50,964	\$374,290
30 nov 2024	\$317,593	\$7,949	\$52,144	\$382,934
31 dic 2024	\$300,033	\$5,707	\$48,976	\$359,669

En particular, se utilizó la información del recibo original y se aplicó la Ecuación 1 para determinar el concepto de energía, mientras que los recargos por bajo factor de potencia se calcularon mediante las ecuaciones 4 y 6. Estos recargos representan penalizaciones económicas derivadas de un bajo desempeño en el uso eficiente de la energía eléctrica, lo cual puede influir significativamente en el importe final. Finalmente, los valores del IVA y del importe total fueron obtenidos utilizando las ecuaciones 9, 10, y 13, asegurando así que el cálculo integral del recibo respondiera fielmente a los criterios técnicos establecidos.

Irregularidades o Discrepancias

Los valores presentados en la Tabla 3 corresponden a discrepancias porcentuales detectadas entre los conceptos facturados que se plasman en el recibo por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y los resultados obtenidos mediante un replanteamiento y cálculo independiente de dichos conceptos con el fin de obtener estas discrepancias, se realizó un procedimiento en el que primero se recalculó cada uno de los conceptos del recibo con base en los datos disponibles (como factor de potencia, consumo de energía y tarifas aplicables), y posteriormente se restó el valor del recibo al resultado del cálculo. Esta diferencia se expresó como porcentaje respecto al valor original registrado por CFE en el recibo.

Los resultados muestran que en ciertos meses existen variaciones significativas que podrían indicar inconsistencias o diferencias en los criterios de facturación. Por ejemplo, en el mes de marzo de 2024 se presenta una diferencia de -7.69% en el concepto de recargo por factor de potencia, lo que sugiere que el valor cobrado por CFE fue menor al valor estimado. Asimismo, en abril de 2024 se detecta una discrepancia de -1.06% en el mismo concepto. Contrariamente, en mayo de 2024 se observó una diferencia positiva de +8.70%, lo que indica que el cálculo independiente fue menor al importe registrado en el recibo.

Tabla 3. Diferencia de discrepancia en porcentaje referente a los conceptos del recibo y lo calculado

Periodo	Energía	Recargo por factor de potencia	IVA	Importe total
31 dic 2023	0.00	0.00	0.00	0.00
31 ene 2024	0.00	0.00	0.00	0.00
29 feb 2024	0.00	0.00	0.00	0.00
31 mar 2024	0.00	-7.69	-0.19	-0.19
30 abr 2024	0.03	-1.06	0.00	0.00
31 may 2024	0.00	8.70	0.20	0.19
30 jun 2024	0.00	0.00	0.00	0.00
31 jul 2024	0.00	0.00	0.00	0.00
31 ago 2024	0.00	0.00	0.00	0.00
30 sep 2024	0.00	0.00	0.00	0.00
31 oct 2024	0.53	-0.21	0.51	0.51
30 nov 2024	0.00	0.00	0.00	0.00
31 dic 2024	0.00	0.00	0.00	0.00

En cuanto al consumo de energía, las discrepancias son generalmente bajas, aunque destacan algunos meses como octubre de 2024, donde se registra una diferencia del +0.53%, posiblemente atribuida a ajustes por redondeo o cambios estacionales en la tarifa. También en ese mismo mes se refleja una diferencia del -0.21% en el recargo por factor de potencia, lo que podría ser resultado de una variación en el comportamiento en que CFE cobra a sus usuarios a causa de los subperiodos o un ajuste no identificado en el cálculo original.

En los conceptos de IVA e importe total, se reflejan discrepancias porcentuales mínimas de %0.51 para el mes de octubre y para el mes de marzo de -0.19, lo cual indica que no se encontraron diferencias notables, estas diferencias se deben a que a través de todo su re-cálculo arrastró discrepancias mínimas para los conceptos de energía, recargo por factor de potencia y IVA lo que influyó en el importe total a pagar, debido a que la diferencia es mínima hablando de que esta misma sería menor a una milésima correspondiente a los montos o que simplemente CFE no cobro exactamente lo que correspondía a ese periodo

Conclusiones

Durante los últimos años, las organizaciones han visto como la energía ha pasado de representar un factor marginal en su estructura de costos global a ser capítulo importante dentro de la misma. Debido al incremento paulatino de los costos de la energía, han tenido que afrontar el reto de disminuir la participación de la energía en la matriz económica, o por lo menos mantener su mismo nivel. Por ello es importante conocer claramente el tipo, como se está utilizando y cuanto se está pagando por este concepto, esta necesidad de responder los cuestionamientos hace imperante la necesidad de entender la estructura tarifaria en la que se encuentra la organización. En este contexto se realizó el análisis de la tarifa GDMTH para la industria manufacturera de calzado, se realizó un desglosé del recibo de facturación del suministrador de servicios básicos encontrando que el cobro de la energía como aparece en el recibo de facturación emitido por CFE incluye el cargo fijo, el consumo de energía, la capacidad y la distribución, posteriormente aplica un recargo o bonificación por factor de potencia.

Una de las características de la tarifa GDMTH es que el costo de la energía varía a lo largo del día, del mes y del año, cuenta con tres periodos a los que llama Base, Intermedia y Punta. La energía más cara es en el horario punta y esta se debe evitar en la medida de lo posible que las actividades de la planta lo permita. En cuanto al consumo energía total, es importante que los usuarios entiendan que la única forma de disminuir los costos asociados a este concepto es aplicando un programa de ahorro y uso racional de la energía para disminuir el uso de esta. La energía más barata es la que no se usa.

La capacidad se entiende que es la demanda máxima media en el periodo punta, sin embargo, el suministrador de servicios básicos permite a los usuarios implementar medidas de ahorro de energía y disminuir el consumo mensual

considerando los tres periodos, al aplicar el criterio emitido y publicado en la página de la CFE para el cobro de este concepto seleccionar el resultado de la Ecuación y no la que midió la CFE, para el caso de la empresa analizada únicamente los meses de diciembre de 2023, marzo de 2023 y diciembre de 2024 la demanda calculada está por debajo de la medida por CFE, por lo tanto, se pueden generar estrategias para disminuir el consumo de energía y en consecuencia disminuir el pago por este concepto. Del mismo modo el concepto de distribución es la demanda máxima que se tuvo en la planta en los tres periodos todo el mes de facturación, en este caso únicamente los meses de abril, mayo y julio de 2024 la demanda calculada fue mayor a la medida por la CFE, sin embargo, nuevamente si se implementan medidas de ahorro de energía en el criterio para seleccionar la demanda al que se va a aplicar el costo por concepto de distribución se seleccionará de la Ecuación y no de la medida por CFE. Además, esto también nos indica que el horario de mayor actividad en la planta se encuentra en el horario intermedio de las 6:00 am a las 18:00 pm.

El factor de potencia también representa un gasto importante en la organización ya que hace referencia en general a que todo el consumo de energía que estamos realizando se está transformando en trabajo útil, un bajo factor de potencia menor al 90% indica que hay desperdicio de energía y el suministrador aplicara una sanción con un recargo que puede llegar hasta un 120%. En estudio realizado se determinó que la planta presenta un promedio mensual de factor de potencia de 86.22% por debajo del 90% solicitado por CFE y le representa a la empresa un porcentaje de recargo de 2.63 % mensual, con un recargo mensual promedio de \$ 7784.

Cabe mencionar que en la comparación realizada de los cobros solicitados a la empresa y los cálculos realizados en el trabajo solamente los meses de marzo, abril y mayo presentan irregularidades mínimas menores al 10% en promedio equivalente a \$500.

Por último, es importante mencionar que contar con esta información es de suma importancia ya que puede ayudar a las organizaciones en la toma de decisiones para aplicar medidas para el uso racional de la energía y con ello disminuir los costos asociados, esto permitirá a la organización aumentar su competitividad ya que podrá destinar los ahorros generados por un buen manejo de la energía en otras áreas de la organización.

Bibliografía

- Almeida, E. J., & Colmenárez, E. D. (2019). Sistema de gestión de energía en instalaciones industriales. *Teorías, Enfoques y Aplicaciones en las Ciencias Sociales*, 24(11), 2610–27910.
- Bautista Almánzar, I. A. (2020). *Compensación de reactivos en instalaciones de sistemas solares fotovoltaicos penalizados por un bajo factor de potencia. Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones.*
- Cervantes Jiménez, M., & Minian Ruiz, M. (2024). Tarifas eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad 2018–2023. *Economía Informa.*
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (2016). *Manual para la implementación de un sistema de gestión de la energía.*
- Comisión Federal de Electricidad. (s. f.). Usuarios y consumo de electricidad por municipio (2010–2017). Recuperado en noviembre de 2019 de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/usuarios-y-consumo-de-electricidad-por-municipio-2010-2017>
- Comisión Federal de Electricidad. (2025). Tarifa GDMTH. Recuperado de <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREnegocio/Tarifas/GranDemandaMTH.aspx>
- Cuevas Muñoz, G. S., Hedekel, M., Ortega, Z., Teresa, S., Cendejas, P., Daniel, C., Robles, G., Merced, J., García, L., & Pizano Martínez, A. (s. f.). Diseño de programa computacional para el dimensionamiento de micro-redes. *Jóvenes en la Ciencia*, 21(XXVIII). Recuperado de www.jovensenciencia.ugto.mx
- Gobierno de México. (15 de julio de 2014). Factor de potencia. Recuperado de <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/factor-de-potencia-sistemas-de-bombeo-bombeo-de-agua-potable-municipal-estados-y-municipios>
- Gutiérrez-Villegas, J. C., Vejar-Ruiz, S., & Escamilla-Martínez, A. (2021). PV system interconnected to the electricity grid with hourly control of energy injection. *DYNA (Colombia)*, 88(217), 84–90. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.88789>
- Hernández Martínez, M., Barrera Valdés, J. G., & Jurado Pérez, F. (2018). Análisis y diagnóstico de eficiencia de generación eléctrica mediante respuesta a la demanda de un sistema eléctrico. *Revista Ingeniantes*, 2(3).
- International Energy Agency. (2025). Cosas que puede hacer para usar menos energía y reducir tus facturas. Recuperado de <https://www.iea.org/topics/saving-energy>
- Martín-Canché, B. del R., Cruz-Chacón, J. J., Vanoye-Eligio, M., Casado-Ramírez, E. del J., Guillen-Taje, J. L., & Alavez-Góngora, J. A. (2024). Simulación y análisis del rendimiento de un sistema fotovoltaico de 45 kW interconectado a la red de una planta purificadora en Escárcega, Campeche. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 267–271. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.229>
- Molina, V., Pedro, V., & Romeo, M. (2023). *Administración y gestión de la energía: casos y experiencias de éxito.* Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/368884159>
- Secretaría de Energía. (2023). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023–2037 (PRODESEN): Capítulo 3. Demanda y consumo 2023–2037.* Recuperado el 19 de mayo de 2025 de <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>