ECONOMÍA CIRCULAR MEXICANA

— VOLUMEN II

María Concepción Martínez Rodríguez
Héctor Guadalupe Ramírez Escamilla
Diego Domínguez Solís
(coordinadores)

EDICIONES COMUNICACIÓN CIENTÍFICA

Educación
Secretaría de Educación Pública

Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Economía circular mexicana
Volumen 2

Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

EDICIONES
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA

COMITÉ EDITORIAL IV
CIENCIAS SOCIALES

Dr. Juan Manuel Álvarez Becerra
Universidad de Guadalajara

Dra. Maria del Pilar Monserrat Perez Hernandez
Instituto Politécnico Nacional

Dra. Natalia Balzaretti Merino
Universidad de Guadalajara

Dr. Carlos Otto Vazquez Salazar
Universidad de Zacatecas

Dr. Félix Jiménez Jiménez
Centro de Evaluación de Capacidades Turísticas de Mercado para el Desarrollo

Cada libro de la Colección Ciencia e Investigación es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación de pares externos y autentificación antiplagio. El proceso de dictaminación y su trazabilidad puede consultarse, así como el libro en Acceso Abierto.

comunicacion-cientifica.com

DOI.ORG/10.52501/cc.365

COMUNICACIÓN CIENTÍFICA
PUBLICACIONES ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

CC+I
COLECCIÓN CIENCIA e INVESTIGACIÓN

Economía circular mexicana
Volumen 2

María Concepción Martínez Rodríguez
Héctor Guadalupe Ramírez Escamilla
Diego Domínguez Solís
(coordinadores)

Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

EDICIONES
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA

Economía circular mexicana. Volumen 2 / María Concepción Martínez Rodríguez, Héctor Guadalupe Ramírez Escamilla, Diego Domínguez Solís (coordinadores). — Ciudad de México : Comunicación Científica, Secretaría de Educación Pública, Instituto Politécnico Nacional, 2026. (Colección Ciencia e Investigación).

Volumen 2 (503 páginas) : gráficas, mapas ; 23 × 16.5 centímetros

ISBN: 978-607-2628-87-8

DOI: 10.52501/cc.365

1. Economía circular — México. 2. Educación ambiental. 3. Desarrollo sustentable. I. Martínez Rodríguez, María Concepción, coordinadora. II. Ramírez Escamilla, Héctor Guadalupe, coordinador. III. Domínguez Solís, Diego, coordinador.

LC: HC79.E5 E36 v.2 DEWEY: 338.927 E36 v.2

La titularidad de los derechos patrimoniales y morales de esta obra pertenece a los coordinadores D.R. © María Concepción Martínez Rodríguez, Héctor Guadalupe Ramírez Escamilla y Diego Domínguez Solís (coordinadores), 2026. Reservados todos los derechos conforme a la Ley. Su uso se rige por una licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0 Internacional, https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es

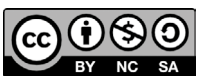
Primera edición en Ediciones Comunicación Científica, 2026

Diseño de portada: Francisco Zeledón • Interiores: Guillermo Huerta

Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., 2026,
Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400,
Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México,
Tel.: (52) 55-5696-6541 • Móvil: (52) 55-4516-2170
info@comunicacion-cientifica.com • www.comunicacion-cientifica.com
comunicacioncientificapublicaciones @ ComunidadCient2

ISBN 978-607-2628-87-8

DOI 10.52501/cc.365



Obra derivada del proyecto de investigación SIP 20251143 patrocinada por el Instituto Politécnico Nacional

Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos externos.
El proceso transparentado puede consultarse, así como el libro en acceso abierto, en https://doi.org/10.52501/cc.365

Índice

Introducción 11

Primera Parte
FUNDAMENTOS Y PERSPECTIVAS GENERALES DE ECONOMÍA CIRCULAR

1. Educación ambiental como impulso cultural para la circularidad en México, *Rodrigo Flôrencio da Silva* 17

2. Financiamiento para la economía circular en México, *Pablo Pérez Akaki* 35

3. Impulso de la economía circular a través de acciones de educación ambiental en un asentamiento irregular de Chilpancingo, Guerrero, México, *Uriel Winston Cabrera Tena y María Concepción López Ojeda* 55

4. Modelo de emprendimiento de proyectos productivos basado en la economía circular y solidaria, *Juan José Bedolla Solano, Irma Bedolla Solano y Adriana Miranda Esteban* 77

Segunda Parte
RECURSOS NATURALES Y SECTORES PRODUCTIVOS: HACIA LA CIRCULARIDAD

5. Potencial de circularidad en el sector minero de México, *Gabriela Muñoz Meléndez* 99

6. De la extracción a la regeneración: La transformación innovadora y sostenible en la minería a través de la economía circular, *Edgar Javier Méndez-Rosales y Denise Margarita Rivera-Rivera* 125

7. *Opuntia* spp. como elemento articulador de la economía circular mexicana: Experiencias y posibilidades, *Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez, Carlos Alexander Lucho Constantino, Rosa Icela Beltrán Hernández, Claudia Coronel Olivares y Juan Andrés Aguilar Huesca* 147

8. Utilización de residuos agrícolas de México para la síntesis sustentable de puntos cuánticos de carbono mediante métodos de química verde, *Claudia Lorena Compeán González y Rubén Ahumada-Lazo*. 175

9. Círculos agroculturales del cacao: Innovación y prácticas de sostenibilidad hacia una marca comunitaria en Tabasco, *Carlos Arturo Olarte Ramos, Viviana Castellanos Suárez y Yazmín Isolda Álvarez García* 199

10. Sistemas de recirculación: Hacia un modelo de economía circular en la acuicultura, *Iván Gallego-Alarcón, Sergio Alcaraz-Ibarra, David García-Mondragón, Gehovana González-Blanco, Boris Miguel López-Rebollar, Carlos Roberto Fonseca, Laura White Olascoaga y Iván Cervantes-Zepeda* 221

11. Turismo circular: Un enfoque integral hacia la sostenibilidad y la innovación en la industria turística, *Violena Hubenova Nencheva y Mauricio Morales González*. 241

12. Impulso de un turismo circular en las comunidades con recursos turísticos del municipio de Balancán, Tabasco, *Kenia Landero Valenzuela* 269

Tercera Parte
ECONOMÍA CIRCULAR Y EL AGUA: CLAVE PARA LA SOSTENIBILIDAD MEXICANA

13. Economía circular y reciclaje del agua en viviendas de Pachuca, Hidalgo, *Sergio Gabriel Ceballos Pérez, Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez, Alfredo Bigurra Alzati, Liliana Lizárraga Mendiola y Miguel Ángel Torres González* 295

14. Gestión del uso del agua en los hogares mexicanos: Una oportunidad para la economía circular, *Berenice Mendoza-Carbajal e Hilda Guerrero García-Rojas*. 317

15. Estrategias de gestión circular del agua para mejorar la competitividad en la industria farmacéutica de la Ciudad de México, *Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel* 335

16. Aguas residuales y la economía circular: Una revisión, *Sergio Alcaraz-Ibarra, Gehovana González-Blanco, Zoe Peña-Ortiz, Abigail Ávila-Andrade, Joaquín Rolando Robles-Muñoz y Ricardo Beristain-Cardoso*. 359

17. Estrategias de gobernanza para el estrés hídrico: Una revisión de enfoques y desafíos, *Diego Domínguez-Solís, María Concepción Martínez-Rodríguez y Andrea Lizeth Pérez-Martínez* 377

Cuarta Parte
GESTIÓN DE RECURSOS Y FLUJOS MATERIALES EN LA ECONOMÍA CIRCULAR

18. Flujo de residuos sólidos urbanos en México: ¿Un camino hacia la economía circular?, *Gehovana González-Blanco, Sergio Alcaraz-Ibarra, Iván Cervantes-Zepeda, Iván Gallego-Alarcón, María Clara Rosas-Gutiérrez, Laura White-Olascoaga y David García-Mondragón* 405

19. Reutilización y electrificación de vehículos como camino hacia una movilidad más eficiente, *Ángel de Jesús Mc Namara Valdés y Rodrigo Flôrencio da Silva* 425

20. ¿Cómo las políticas públicas pueden impulsar la gestión de residuos domésticos? Un estudio de caso en México, *Héctor Guadalupe Ramírez-Escamilla, María Concepción Martínez-Rodríguez y Diego Domínguez-Solís* 445

Sobre los autores 473

Introducción

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.00.01

En los últimos años, la economía circular se ha consolidado como una estrategia clave para enfrentar los desafíos ambientales, sociales y económicos del siglo XXI. En México, esta transición ha comenzado a manifestarse en múltiples sectores, impulsada tanto por iniciativas institucionales como por esfuerzos ciudadanos, académicos y empresariales.

Este segundo volumen del libro *Economía circular mexicana* reúne 20 capítulos que ofrecen una visión amplia y diversa sobre los avances, retos y propuestas en torno a la economía circular en el país. La obra está estructurada en cuatro secciones temáticas que abordan desde fundamentos teóricos y educativos hasta casos prácticos en sectores productivos, gestión del agua, y manejo de residuos y flujos materiales.

I. Fundamentos y perspectivas generales de economía circular

Esta primera sección establece las bases conceptuales y culturales para comprender el tránsito hacia una economía circular en México, con énfasis en la educación, la participación ciudadana y el financiamiento como elementos catalizadores.

En el capítulo 1 se explora cómo la formación ambiental puede fomentar una transformación cultural orientada hacia modelos sostenibles.

El capítulo 2 aborda los principales instrumentos financieros, tanto públicos como privados, que pueden facilitar la implementación de proyectos circulares en el contexto nacional.

En el capítulo 3 se presenta un estudio de caso que ejemplifica cómo la sensibilización y educación comunitaria pueden detonar procesos circulares en contextos de vulnerabilidad urbana.

Finalmente, el capítulo 4 propone un esquema alternativo de desarrollo económico que integra principios de solidaridad y circularidad, orientado al fortalecimiento de iniciativas locales y comunitarias.

II. Recursos naturales y sectores productivos: Hacia la circularidad

La segunda parte del libro examina el potencial de la economía circular en sectores estratégicos como la minería, la agricultura, el turismo y la acuicultura, enfatizando tanto los desafíos como las experiencias exitosas.

En el capítulo 5 se realiza un diagnóstico sobre el contexto actual del sector minero en México y se identifican oportunidades para su transformación desde una perspectiva circular.

El capítulo 6 complementa esta visión mediante propuestas concretas para fomentar una minería más innovadora, regenerativa y sostenible.

Los capítulos 7 y 8 exploran el aprovechamiento de recursos agroindustriales y agrícolas, incluyendo especies vegetales con potencial bioeconómico, así como su aplicación en desarrollos tecnológicos mediante principios de química verde.

En el capítulo 9 se analiza una experiencia comunitaria enfocada en productos agroecológicos y en la articulación entre sostenibilidad, identidad cultural y economía local.

El capítulo 10 presenta un enfoque técnico sobre la eficiencia hídrica y la reducción de residuos en el ámbito de la acuicultura, a través de sistemas de recirculación.

Por su parte, los capítulos 11 y 12 abordan la integración de la circularidad en el sector turístico, destacando estrategias para impulsar modelos sostenibles en destinos comunitarios con potencial turístico, promoviendo la innovación, la conservación y el beneficio social.

III. Economía circular y el agua: Clave para la sostenibilidad mexicana

El agua, como recurso esencial y cada vez más escaso, ocupa un lugar prioritario en esta tercera sección, la cual ofrece diversas propuestas para su gestión eficiente bajo una perspectiva circular.

En el capítulo 13 se presentan soluciones domésticas aplicadas al reúso y reciclaje del agua, como parte de una estrategia de sostenibilidad a nivel de vivienda.

El capítulo 14 profundiza en el papel del consumo consciente y la eficiencia hídrica dentro de los hogares mexicanos, con una visión centrada en la ciudadanía.

En el capítulo 15 se analizan prácticas innovadoras de gestión circular del agua implementadas en la industria farmacéutica, particularmente en contextos urbanos con alta demanda hídrica.

El capítulo 16 ofrece una revisión de marcos conceptuales, normativos y tecnológicos aplicables al tratamiento y reaprovechamiento de aguas residuales en México.

Finalmente, el capítulo 17 propone modelos de gobernanza y estrategias participativas para enfrentar el estrés hídrico, abordando los desafíos institucionales y territoriales desde una perspectiva interdisciplinaria.

IV. Gestión de recursos y flujos materiales en la economía circular

La sección final aborda el manejo de residuos, la movilidad sostenible y la infraestructura urbana necesaria para cerrar ciclos de materiales y promover sistemas más eficientes.

En el capítulo 18 se analizan las dinámicas actuales de generación, recolección y disposición de residuos sólidos urbanos en México, así como su potencial para la valorización y el cierre de ciclos materiales.

El capítulo 19 presenta una propuesta centrada en la reutilización de vehículos y la electrificación del transporte como estrategia para avanzar hacia una movilidad circular, eficiente y baja en emisiones.

Por último, el capítulo 20 incorpora un análisis sobre cómo las políticas públicas pueden impulsar la gestión de residuos domésticos en México, destacando la importancia de establecer marcos regulatorios claros y estrategias de gobernanza que fomenten la separación, recolección y valorización de los residuos generados en los hogares. Se examinan los retos, oportunidades y lecciones aprendidas que permiten avanzar hacia un modelo más circular, eficiente e inclusivo en la gestión de los residuos domésticos, subrayando el papel central que desempeñan los instrumentos de política pública en la transición hacia la economía circular.

Este volumen refleja la diversidad de enfoques y actores que están impulsando la economía circular en México. Desde experiencias comunitarias hasta innovaciones tecnológicas, pasando por análisis institucionales y propuestas educativas, los capítulos aquí reunidos dan cuenta de una transformación en marcha, donde la circularidad no solo es una alternativa deseable, sino una necesidad urgente.

María Concepción Martínez Rodríguez
Héctor Guadalupe Ramírez Escamilla
Diego Domínguez Solís

Primera Parte

FUNDAMENTOS Y PERSPECTIVAS GENERALES DE ECONOMÍA CIRCULAR

1. Educación ambiental como impulso cultural para la circularidad en México

Rodrigo Flôrencio da Silva[1]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.01

Resumen

La transición hacia una economía circular exige más que ajustes tecnológicos o mejoras en la gestión de residuos. Requiere también una transformación cultural que permita repensar la forma en que nos relacionamos con los recursos, los territorios y los demás seres vivos. En ese horizonte, la educación ambiental representa una herramienta clave para promover cambios duraderos, al conectar saberes técnicos con conocimientos comunitarios y activar una conciencia ecológica desde etapas tempranas. Este capítulo reflexiona sobre el papel de la educación ambiental en la construcción de una cultura circular en México, con el objetivo de entender cómo se abordan estas relaciones en la producción académica reciente. Para ello, se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura científica publicada entre 2014 y 2024, utilizando las bases de datos Scopus, Web of Science, ERIC, Emerald, Redalyc y SciELO. El análisis fue complementado con un mapa de coocurrencias de palabras clave generado con VOSviewer, que permitió visualizar los núcleos conceptuales destacados. Los resultados mostraron un interés creciente por los temas de sostenibilidad y circularidad, aunque con una fuerte carga técnica. La educación ambiental apareció con menor presencia, y cuando se incluyó fue muchas veces desde enfoques aislados o instrumentales. Se observaron pocas conexiones con la diversidad cultural, los saberes locales o la acción comunitaria. A partir de estos hallazgos, se propone refor-

[1] Doctor en Medio Ambiente. Profesor-investigador en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9644-7645

zar una educación ambiental más crítica, participativa y arraigada en los contextos, que contribuya a imaginar formas de vida más justas, sostenibles y compartidas.

Palabras clave: *educación ambiental, economía circular, cambio cultural, sustentabilidad y ciudadanía ecológica.*

Introducción

En México, como en muchas otras partes del mundo, la relación entre la sociedad y el entorno natural ha atravesado una transformación acelerada y, en muchos sentidos, desequilibrada. Según Buch (2020), la expansión de modelos económicos extractivistas, la urbanización descontrolada, el consumo desmedido de recursos y la generación constante de residuos han producido una crisis ambiental multifacética. Esta crisis va mucho más allá de la contaminación del aire, del agua o del suelo, también se expresa en la pérdida acelerada de biodiversidad, en el deterioro de los ecosistemas y en el aumento de la vulnerabilidad que enfrentan muchas comunidades ante fenómenos climáticos cada vez más extremos (Svampa y Viale, 2020). En este panorama, la economía circular aparece como una alternativa capaz de cuestionar los fundamentos del modelo lineal dominante, basado en extraer, producir, consumir y desechar, y proponer en su lugar una lógica regenerativa que redefine el valor, la duración y el destino de los recursos. Tal como lo explican Kirchherr et al. (2023), este modelo propone una reconfiguración estructural del crecimiento económico:

> La economía circular se presenta cada vez más como un modelo económico alternativo, diseñado para reemplazar el sistema lineal tradicional. Su propósito es redefinir el crecimiento, enfocándose en beneficios sociales y ambientales positivos, desacoplando la actividad económica del consumo de recursos finitos. (p. 3)

Sin embargo, la transición hacia una economía circular va mucho más allá del rediseño tecnológico o de la innovación en los procesos industria-

les, ya que exige, ante todo, una transformación cultural profunda que cuestione nuestros modos de vida, producción y consumo (Pfeffer et al., 2025). Cambiar la forma en que las personas comprenden y se relacionan con los objetos, los residuos, los ciclos naturales y los límites del planeta requiere mucho más que normativas o incentivos económicos. Se necesita una transformación en los imaginarios colectivos, en las formas de habitar el mundo, en las narrativas sociales que sostienen las decisiones cotidianas (Chizaryfard et al., 2021). Aquí es donde la educación ambiental, en su sentido más amplio y comprometido, puede convertirse en un motor poderoso para el cambio.

En el caso de México, hablar de circularidad es clave cultural exige reconocer las contradicciones y potencialidades del contexto nacional. Por un lado, existen saberes comunitarios profundamente arraigados que desde hace siglos han practicado formas de economía circular sin llamarlas así, desde la reutilización creativa de materiales hasta el uso respetuoso de los recursos locales, pasando por prácticas agrícolas regenerativas, rituales de reciprocidad con la tierra y lógicas de consumo, basadas en la reparación, el intercambio y la proximidad (Campos Cabral, 2024). Para Pereira et al. (2019), estos conocimientos, presentes en pueblos indígenas, comunidades rurales y sectores populares urbanos, han sido frecuentemente marginados por el discurso hegemónico del desarrollo, aunque constituyen una fuente valiosa de prácticas sostenibles con profundo arraigo territorial.

Por otro lado, la expansión de patrones de consumo masivo, promovidos por la publicidad, los medios de comunicación y una globalización centrada en la acumulación, ha consolidado prácticas profundamente insostenibles en los ámbitos urbano e industrial (Kanger y Sillak, 2020). La educación formal, en muchos casos, no ha logrado contrarrestar esta tendencia. Por el contrario, ha reproducido esquemas fragmentados de conocimiento, desconectados de los territorios, carentes de enfoque sistémico y poco sensibles a las urgencias socioambientales del país. Así, los residuos se siguen viendo como basura y no como recursos, los ecosistemas, como obstáculos para el desarrollo y no como aliados para la vida, y la educación, como una transmisión de contenidos, no como un proceso de transformación individual y colectiva (González Reyes, 2018).

Esta forma limitada de comprender y aplicar la educación ambiental ha sido señalada con claridad por diversos autores críticos. Martínez Castillo (2012), por ejemplo, plantea que:

> La educación, tal y como se ha venido impartiendo, ha estado dirigida a la simple transmisión de conocimientos científicos sobre el ambiente […] Esto hace que los objetivos de la educación ambiental no estén dirigidos a la verdadera raíz del problema; es decir, a cuestionar el modelo civilizatorio actual, con sus patrones productivistas, consumistas y derrochadores impuestos por la ideología neoliberal del mercado global desregularizado, sin crítica. (p. 78)

El desafío, entonces, no reside únicamente en introducir el concepto de economía circular en los planes de estudio o en las políticas públicas, sino en cultivar una nueva sensibilidad cultural que reconozca la interdependencia entre lo humano y lo no humano, que cuestione el mito del progreso ilimitado y que habilite espacios de creación colectiva para imaginar otras formas de vivir. De acuerdo con Melendro (2010), este tipo de educación ambiental no puede mantenerse en una posición neutral o aséptica, pues requiere posicionarse críticamente frente a las estructuras que perpetúan la desigualdad ecológica y social, y desempeñar un papel activo como puente entre la justicia ambiental y la justicia cognitiva.

Actualmente, diversos esfuerzos desde organizaciones civiles, colectivos docentes, instituciones académicas y movimientos sociales han empezado a incorporar esta visión crítica de la educación ambiental (Flôrencio da Silva et al., 2023). Talleres de reciclaje creativo en barrios periféricos, huertos escolares con enfoque agroecológico, programas de separación de residuos en universidades, festivales de trueque, campañas de revalorización de saberes indígenas y cursos de diseño regenerativo son solo algunos ejemplos de cómo la circularidad empieza a enraizarse en prácticas pedagógicas vivas, situadas y dialogantes (Salgado, 2007). No obstante, estos esfuerzos aún son aislados y muchas veces dependen de voluntades individuales o proyectos piloto sin continuidad institucional.

A pesar de estos esfuerzos, diversos autores señalan que aún falta consolidar un enfoque educativo que logre articular transformación social con justicia ambiental. Como señalan Flôrencio da Silva et al. (2023):

> La educación ambiental crítica se asume como una práctica social que articula procesos ecológicos y sociales, reconociendo que las relaciones con la naturaleza se dan a través de mediaciones culturales, históricas y simbólicas. Por ello, no basta con integrar contenidos ambientales al currículo; es necesario promover procesos formativos que cuestionen el modelo de producción capitalista, fortalezcan la identidad de los pueblos y abran horizontes colectivos y cooperativos para la reorientación de la vida y la relación humanidad-naturaleza. (p. 12)

Las políticas educativas nacionales han hecho avances en la inclusión de contenidos ambientales, pero muchas veces se quedan en el plano declarativo. La transversalidad prometida rara vez se concreta en propuestas curriculares coherentes y sostenidas, y persiste una visión utilitarista del medio ambiente centrada en la "concientización" más que en la acción transformadora. Además, sigue existiendo una brecha entre los niveles de educación básica, media y superior en cuanto a la profundidad y la coherencia de los contenidos relacionados con sostenibilidad y circularidad.

Como plantean Pereira et al. (2023), repensar el papel de la educación ambiental implica una transformación estructural de los enfoques dominantes:

> La educación ambiental debe dejar de ser vista únicamente como un complemento curricular o una asignatura aislada, y pasar a ocupar un lugar central en la formación de sujetos críticos. Esto exige superar el discurso de la sensibilización y asumir la responsabilidad de promover cambios culturales, políticos y económicos que respondan a la crisis civilizatoria que enfrentamos como región. (p. 76)

En este sentido, es indispensable repensar el papel de la educación ambiental como un proceso integral que va más allá del aula y que involucra la participación activa de diversos actores: docentes, estudiantes, familias, autoridades locales, líderes comunitarios, científicos, artistas y comunicadores (Dillon y Herman, 2023). La circularidad no puede enseñarse de manera abstracta o descontextualizada, ya que cobra sentido cuando se experimenta, se discute y se resignifica en los territorios donde las perso-

nas viven y resisten. Necesita anclarse en experiencias significativas que articulen teoría y práctica, que vinculen el pensamiento con la emoción y la acción, y que propicien el desarrollo de una ciudadanía ecológica crítica (Pereira y de Azevedo Gibbon, 2014).

Para Calixto Flores (2012), este cambio de enfoque implica revisar los marcos conceptuales que han guiado la educación ambiental en México. Durante décadas, esta ha estado influida por paradigmas conservacionistas, con un énfasis en la protección de la naturaleza como algo externo al ser humano. Aunque importantes, estas perspectivas han demostrado ser insuficientes para responder a los desafíos actuales. Una educación ambiental orientada hacia la circularidad debe integrar la perspectiva socioecológica, que reconoce las interacciones complejas entre cultura, economía y naturaleza, y que asume la sustentabilidad no como un objetivo técnico, sino como una construcción política y ética.

Esta necesidad de replantear los marcos conceptuales de la educación ambiental también ha sido destacada por diversos autores que reconocen sus limitaciones históricas. En este sentido, Calixto Flores (2012) sostiene:

> La educación ambiental se propone, a través del desarrollo de diversas estrategias pedagógicas, contribuir a la formación de una conciencia sobre la responsabilidad del género humano en la continuidad de las distintas formas de vida en el planeta, así como a la formación de sujetos críticos y participativos ante los problemas ambientales. A la educación ambiental le interesa no sólo explicar los problemas del ambiente natural, sino también del social y el transformado, en el que se manifiestan con toda claridad las distintas responsabilidades de los sectores sociales. (p. 1021)

El reconocimiento de la diversidad cultural de México representa una oportunidad clave para fortalecer esta visión, ya que permite construir múltiples formas de habitar y producir en armonía con los ciclos de la vida, en lugar de imponer un modelo único de circularidad (Méndez, 2021). Esto requiere abrir espacios educativos que valoren la palabra de los abuelos, la experiencia de las campesinas, la creatividad de las juventudes, el arte como lenguaje de resistencia, y la memoria como insumo pedagógico (Quintero Bernate, 2024). En este sentido, la circularidad no debe entenderse única-

mente como un modelo económico, pues representa además una práctica cultural que recupera la noción de ciclos, retornos y continuidad.

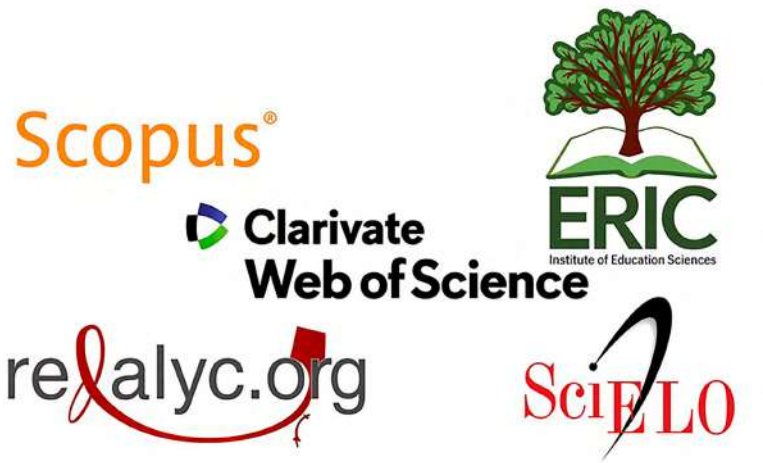
Es urgente que la educación ambiental en México se apropie de esta visión y actúe como catalizadora de una cultura circular que sea, a la vez, crítica, sensible y transformadora (Flores y Reyes, 2010). Este proceso no se dará de forma espontánea o automática, ya que implica voluntad política, formación docente, investigación interdisciplinaria, recursos adecuados y, sobre todo, una escucha atenta a los saberes que ya existen y resisten en los márgenes. La educación ambiental puede ser ese puente que conecta el pasado con el futuro, lo local con lo global, la urgencia con la esperanza (Penagos, 2009). Pero para ello debe abandonar el discurso vacío y animarse a acompañar los procesos reales, conflictivos y potentes, que están ocurriendo en los territorios y en las conciencias.

Metodología

Para este capítulo, se eligió una estrategia metodológica que permitiera analizar cómo se relacionan la educación ambiental, la cultura y la economía circular en contextos latinoamericanos, con especial atención al caso mexicano. A diferencia de una simple recopilación de fuentes, el trabajo metodológico fue pensado como una práctica de lectura crítica, orientada a identificar los temas que se reiteran en la literatura y también las formas en que estos conceptos se agrupan, dialogan, se distancian o se superponen en la producción científica actual.

Para ello, se optó por una revisión de literatura científica, con énfasis en publicaciones académicas que se sitúan dentro del periodo comprendido entre 2014 y 2024. Esta delimitación temporal respondió a dos razones principales: por un lado, la consolidación reciente del concepto de economía circular como eje discursivo en las políticas de sostenibilidad, y por otro, el creciente interés por incorporar la dimensión cultural en las prácticas educativas relacionadas con el medio ambiente. Tomar como referencia este periodo permitió capturar una etapa particularmente activa del debate, marcada por múltiples propuestas, replanteamientos y nuevas articulaciones conceptuales.

Figura 1.1. *Bases de datos empleadas en la revisión sistemática: Scopus, Web of Science, ERIC, Redalyc y SciELO*



Fuente: elaboración propia con base en los logotipos de cada plataforma.

En cuanto a las fuentes de información, se seleccionaron seis bases de datos de alcance internacional y regional: Scopus, Web of Science, ERIC, Emerald, Redalyc y SciELO. La figura 1.1 muestra las bases de datos utilizadas para la revisión sistemática realizada en este capítulo. Esta combinación respondió a la intención de incluir tanto la producción académica que circula en los grandes centros editoriales globales como aquella que se construye desde instituciones latinoamericanas, muchas veces con un mayor grado de proximidad a los territorios y a las realidades sociales concretas. La inclusión de fuentes tanto internacionales como regionales, respondió al interés de construir un panorama más equilibrado, en el que diversas formas de nombrar, teorizar e investigar sobre estos temas pudieran encontrarse y dialogar entre sí.

La búsqueda bibliográfica se realizó mediante el uso de operadores booleanos, combinando términos en español, inglés y portugués. Las palabras clave seleccionadas —como "educación ambiental", "economía circular", "cultura ambiental", "saberes tradicionales", "residuos", "formación docente", "desarrollo sostenible", "interculturalidad", "innovación educativa" y otras relacionadas, fueron seleccionadas tras una revisión preliminar de

literatura, con el fin de asegurar la pertinencia conceptual de los textos recuperados. Se priorizaron artículos de investigación, revisiones sistemáticas, ensayos teóricos y capítulos de libros académicos indexados, excluyendo tesis, notas editoriales, publicaciones sin revisión por pares o textos centrados exclusivamente en tecnologías sin vínculo con la dimensión educativa.

Una vez reunido el conjunto de textos seleccionados, se procedió a una depuración de la información. Además de eliminar duplicados y documentos sin acceso completo, el proceso incluyó una revisión detallada de los resúmenes y, en muchos casos, del texto completo, con el objetivo de verificar que el enfoque de cada artículo estuviera alineado con los objetivos de este capítulo. La inclusión de un texto no dependía únicamente de que mencionara los términos buscados, también se valoraba que ofreciera una reflexión sustantiva sobre al menos dos de los tres ejes centrales del estudio: la educación ambiental, la cultura y la economía circular.

Los documentos seleccionados fueron sistematizados en una matriz de análisis que permitió organizar la información de forma estructurada. Se registraron datos como el autor, el año de publicación, país de procedencia, nivel educativo abordado, el enfoque metodológico adoptado, la ubicación territorial del caso de estudio, los actores implicados y, de manera particular, la manera en que se articulaban, explícita o implícitamente, los tres conceptos que dan sentido a este trabajo. Esta sistematización fue fundamental para comenzar a delinear patrones comunes, enfoques dominantes, omisiones recurrentes y también tensiones conceptuales no resueltas.

Como parte del procesamiento complementario del material, se incorporó un ejercicio de análisis bibliométrico limitado al uso de la herramienta VOSviewer, con el objetivo específico de construir un mapa de coocurrencias de palabras clave. Esta herramienta fue utilizada como recurso visual para representar gráficamente las asociaciones más frecuentes entre los términos empleados en los artículos seleccionados, lo que permitió identificar núcleos temáticos, agrupamientos conceptuales y posibles distancias entre enfoques que, en el plano discursivo, suelen considerarse afines. Es importante destacar que el uso de VOSviewer no tuvo como finalidad cuantificar la producción ni establecer rankings de palabras o au-

tores, su propósito fue servir como apoyo visual para observar con mayor claridad cómo se están relacionando ciertos conceptos en el terreno académico.

Para generar este mapa, fue necesario realizar una normalización previa del lenguaje, agrupando términos equivalentes o variantes idiomáticas bajo categorías comunes, a fin de evitar distorsiones por diferencias mínimas de redacción. De esta manera, expresiones como "educación ambiental" y *"environmental education"*, o "economía circular" y *"circular economy"*, fueron tratadas como equivalentes dentro del mismo campo analítico. Una vez procesada la información, el mapa generado mostró de manera estructurada la densidad de vínculos entre los distintos conceptos, permitiendo observar las asociaciones predominantes y aquellas que apenas aparecen conectadas, lo cual ofreció un punto de partida para reflexionar críticamente sobre los énfasis y los vacíos presentes en el campo.

La parte metodológica de este trabajo buscó entender cómo se están abordando las relaciones entre cultura, educación ambiental y sostenibilidad en los textos académicos. Más que contar datos o medir frecuencia de términos, el interés fue ver qué ideas aparecen con más fuerza, cuáles se repiten sin mucho análisis y qué temas siguen sin recibir la atención que merecen. La revisión y el análisis bibliométrico se usaron como herramientas de apoyo para organizar esa información y tener una visión más clara del estado actual del campo.

Resultados

Los resultados obtenidos, a partir de la revisión sistemática y del análisis de coocurrencias de palabras clave, evidencian un crecimiento sostenido en la producción académica que aborda las relaciones entre educación ambiental, economía circular y sostenibilidad. Esta tendencia refleja un interés creciente por parte de la comunidad científica en repensar el papel de los procesos educativos frente a las transformaciones que exige la transición hacia modelos más respetuosos con los límites ecológicos y culturales del planeta.

Uno de los primeros aspectos que llama la atención es la centralidad que han adquirido conceptos como "economía circular" y "desarrollo sos-

tenible" en el discurso académico contemporáneo. En el mapa generado por VOSviewer, estos términos aparecen como nodos de gran tamaño, rodeados de una densa red de conexiones, lo que sugiere una alta frecuencia de uso y también una presencia transversal en múltiples áreas temáticas. En contraste, el término "educación", aunque presente, ocupa un espacio más reducido y tiende a vincularse con núcleos conceptuales específicos, como "enseñanza", "currículo", "aprendizaje" o "formación", sin alcanzar la misma proyección sistémica que los términos asociados a la economía o a la planificación ambiental.

Este desbalance semántico no puede leerse como un simple dato técnico. Refleja una tendencia a considerar la educación ambiental como un componente instrumental o complementario de los procesos de sostenibilidad, más que como un eje articulador con capacidad transformadora propia. La literatura revisada muestra avances importantes en la incorporación de nociones ambientales en los espacios escolares, universitarios y comunitarios, sin embargo, estos esfuerzos se dan muchas veces de forma fragmentada, dependiendo de proyectos puntuales, marcos normativos poco vinculantes o esfuerzos aislados de actores comprometidos.

Esta distancia entre la centralidad que ocupan términos como "economía circular" o "desarrollo sostenible" y el lugar más marginal de la educación ambiental dentro del discurso académico no es nueva. Ya ha sido advertida por quienes han estudiado críticamente la forma en que los sistemas educativos han incorporado, de manera parcial o superficial, los principios de la educación ambiental. Terrón Amigón (2004) observa que:

> En la práctica de la educación ambiental poco se han aplicado los principios rectores que ésta plantea y aún no se resuelve una problemática educativa tradicional que data de muchos decenios atrás y obstaculiza mejores resultados en la formación de los escolares. (p. 109)

La imagen de coocurrencias muestra también que términos como "reciclaje", "residuos", "logística inversa" y "tecnología" aparecen fuertemente conectados con la noción de circularidad, lo cual sugiere que el enfoque predominante sigue estando fuertemente anclado en una lógica técnica y productiva. En este contexto, la educación ambiental corre el riesgo de ser

reducida a una estrategia de difusión de buenas prácticas, sin llegar a cuestionar de fondo los modelos de consumo, los sistemas de poder que los sostienen ni las narrativas culturales que los legitiman. Aunque existen propuestas pedagógicas críticas y experiencias formativas que buscan romper con esa lógica, su presencia en la literatura científica aún es minoritaria.

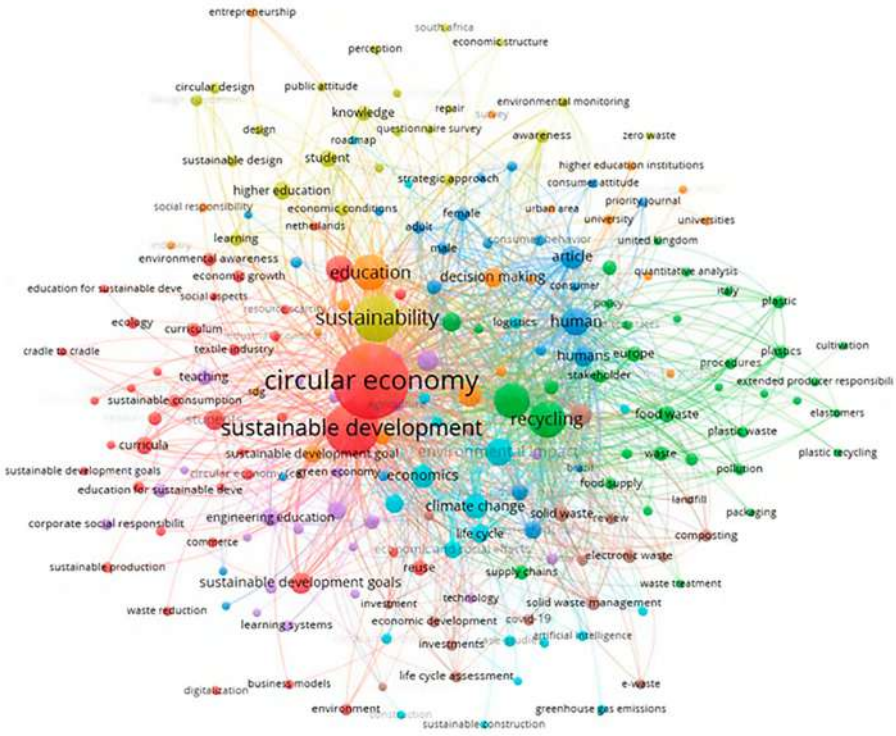
Esta lógica instrumental ha sido cuestionada desde enfoques que insisten en una transformación más profunda del sistema educativo. Flórez-Yepes (2015) advierte:

> La educación debe convertirse en un espacio donde sus aulas se conviertan en verdaderos centros de producción de conocimiento, donde se prepare tanto a docentes como estudiantes para un cambio de comportamiento, donde se integren los principios de sostenibilidad, los cuales deben convertirse en lineamientos de vida. (p. 6)

Otro punto relevante es la baja visibilidad de conceptos como "interculturalidad", "saberes comunitarios", "territorio" o "diversidad cultural". Cuando estos aparecen, suelen estar más relacionados con estudios de caso específicos que con marcos teóricos consolidados. Esta situación evidencia una de las limitaciones más significativas del campo: la escasa conexión entre los debates globales sobre circularidad y las experiencias concretas de los pueblos que, desde hace generaciones, han sostenido prácticas regenerativas sin necesidad de etiquetarlas como "innovación". La desconexión entre lo académico y lo comunitario persiste como una barrera para construir una educación ambiental verdaderamente transformadora y enraizada en los contextos.

En términos curriculares, la revisión muestra un avance importante en la inclusión de la sostenibilidad en programas educativos, particularmente en la educación superior. Sin embargo, esta inclusión rara vez se traduce en una transversalidad efectiva. En muchas ocasiones, los contenidos ambientales se concentran en materias optativas o en módulos específicos, sin alcanzar un enfoque interdisciplinario que atraviese los planes de estudio de manera coherente. Esta fragmentación limita el impacto de la educación ambiental, al tiempo que reduce su potencial para generar una

Figura 1.2. *Mapa de coocurrencias de palabras clave generado en el análisis bibliométrico*



Fuente: elaboración propia con base en datos procesados en VOSviewer.

conciencia crítica y sistémica sobre los desafíos socioecológicos contemporáneos.

La figura 1.2 muestra el mapa de coocurrencias de palabras clave generado a partir del análisis bibliométrico, donde se visualizan las conexiones más frecuentes entre conceptos relacionados con economía circular, sostenibilidad, educación y medio ambiente en la literatura científica analizada.

La falta de propuestas pedagógicas que integren la dimensión cultural de la sostenibilidad se mantiene como una deuda pendiente en la mayoría de los estudios analizados. Aunque algunos textos reconocen la importancia de recuperar saberes locales, valorar la diversidad epistémica o promover el diálogo entre conocimientos científicos y tradicionales, pocas veces se desarrollan estrategias concretas que permitan llevar estas ideas al

aula o al espacio comunitario. Esta ausencia, más que una omisión menor, representa un obstáculo serio para el fortalecimiento de una cultura circular que no sea impuesta desde arriba, sino construida desde la pluralidad de voces que conviven en los territorios.

A pesar de estas limitaciones, la aparición del término "circularidad" en el campo educativo representa una apertura conceptual significativa que no se observaba hace una década. A medida que este concepto se expande, aparecen también nuevas preguntas, nuevas formas de enseñar, de investigar y de intervenir. En los márgenes del mapa, y también en los márgenes de la academia, surgen experiencias que articulan arte, agroecología, narrativas orales, prácticas colaborativas, tecnologías apropiadas y pedagogías afectivas como parte de una educación ambiental comprometida con la vida y no solo con la eficiencia.

Estos resultados invitan a pensar que el crecimiento del interés académico por la educación ambiental en clave circular es real, pero aún incipiente en términos estructurales. La literatura revisada muestra más promesas que consolidaciones, más ensayos que políticas duraderas, más esfuerzos individuales que estrategias colectivas.

Aunque el campo aún se encuentra en construcción, diversos autores han señalado la necesidad de comprender la educación ambiental como un proceso profundamente transformador y no como una mera extensión técnica del desarrollo sostenible. En este sentido, Martínez Castillo (2010) afirma:

> La educación ambiental debe ser un proceso que genere aprendizajes mediante la construcción y reconstrucción de conocimientos, como resultado del estudio de las complejas interacciones sociedad-ambiente, lo que ha de generar conciencia en la ciudadanía de su papel como parte integrante de la naturaleza, para que desarrollen nuevas relaciones, sentires, actitudes, conductas y comportamientos hacia ella. Pero, también, debe llevarnos a reflexionar, a cuestionar y a valorar los estilos de desarrollo y de progreso convencional. (p. 103)

Este panorama, lejos de ser motivo de desánimo, debe ser leído como una invitación a continuar abriendo el campo, a sostener la conversación,

a vincular los mundos que rara vez dialogan entre sí. La educación ambiental, cuando se entiende como un proceso cultural profundo, tiene la capacidad de transformar lo que hacemos con los residuos y también lo que pensamos del mundo y de nuestro lugar en él.

Conclusión

Este capítulo se propuso analizar cómo la educación ambiental, pensada desde los principios de la economía circular, está siendo abordada en la producción académica reciente, especialmente en contextos latinoamericanos y, de manera particular, en México. Más allá de describir tendencias, el objetivo fue problematizar el modo en que los conceptos de circularidad, sostenibilidad y cultura se entrelazan, o se mantienen desconectados, en las propuestas educativas que buscan responder a los desafíos socioambientales contemporáneos.

Lejos de ofrecer respuestas concluyentes, este trabajo deja claro que el campo se encuentra en construcción. Si bien hay un creciente interés académico por explorar la relación entre educación ambiental y circularidad, persisten enfoques fragmentados, una visión técnica predominante y una escasa articulación con los saberes comunitarios y las realidades territoriales. Este panorama no invalida lo avanzado, pero obliga a repensar las estrategias de investigación, de formación docente y de diseño curricular con una mirada más crítica, inclusiva y transformadora.

Uno de los aprendizajes más significativos de este trabajo es que incorporar nuevos contenidos a los programas escolares no es suficiente, es necesario replantear las preguntas que orientan nuestras prácticas educativas. ¿Cómo formar una ciudadanía ambiental crítica en contextos atravesados por la desigualdad estructural? ¿Qué lugar ocupan los conocimientos ancestrales y las pedagogías populares en la construcción de una cultura circular con sentido social? ¿Qué tipo de innovación educativa necesitamos cuando el propósito va más allá de preparar para el mercado y busca formar para la vida en común?

A partir de estas preguntas, se abre un camino fértil para futuras investigaciones. Será fundamental seguir profundizando en las experiencias

educativas que ya están ocurriendo en escuelas, comunidades, cooperativas, universidades y movimientos sociales, muchas veces sin visibilidad académica, pero con un potencial transformador enorme. También será necesario fomentar metodologías de investigación participativa, enfoques interculturales y marcos curriculares que integren lo ambiental como parte fundamental de todo proceso educativo, y no como un contenido aislado o complementario.

Este capítulo no busca dar por cerrada la discusión, más bien, pretende aportar elementos que permitan ampliarla con mayor fuerza y rigor. Al poner en diálogo las nociones de educación ambiental, circularidad y cultura, queda claro que enseñar a reciclar o reducir impactos resulta insuficiente. Lo que realmente está en juego es la posibilidad de imaginar y construir, desde la educación, otras formas de habitar el mundo con dignidad, respeto y responsabilidad compartida.

Referencias

Amigón, E. T. (2004). La educación ambiental en la educación básica, un proyecto inconcluso. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (México)*, *34*(4), 107-164.

Buch, T. (2020). *Desarrollo y ecopolítica: Los grandes debates de la tecnología, el ambiente y la sociedad*. Lenguaje Claro.

Calixto Flores, R. (2012). Investigación en educación ambiental. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, *17*(55), 1019-1033.

Campos Cabral, V. (2024). *Economía circular comunitaria: Experiencias de aplicación en México.* https://repositorio.iberopuebla.mx/bitstream/handle/20.500.11777/6019/ECONOM%c3%8dA%20CIRCULAR-pdf%20integrado.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Castillo, R. M. (2010). La importancia de la educación ambiental ante la problemática actual. *Revista Electrónica Educare*, *14*(1), 97-111.

Chizaryfard, A., Trucco, P. y Nuur, C. (2021). The transformation to a circular economy: Framing an evolutionary view. *Journal of Evolutionary Economics*, *31*, 475-504.

Dillon, J. y Herman, B. (2023). Environmental education. En *Handbook of research on science education* (pp. 717-748). Routledge.

Flôrencio da Silva, R., Torres-Rivera, A. D., Alves Pereira, V., Regis Cardoso, L. y Becerra, M. J. (2023). Critical environmental education in Latin America from a socio-environmental perspective: Identity, territory, and social innovation. *Sustainability*, *15*(12), 9410.

Flores, R. C. y Reyes, L. H. (2010). Estudio sobre la percepciones y la educación ambiental. *Tiempo de Educar*, *11*(22), 227-249.

Flórez-Yepes, G. Y. (2015). La educación ambiental y el desarrollo sostenible en el contexto colombiano. *Revista Electrónica Educare*, *19*(3), 432-443.

González Reyes, L. (2018). *Educar para la transformación ecosocial.* https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/44358

Kanger, L. y Sillak, S. (2020). Emergence, consolidation and dominance of meta-regimes: Exploring the historical evolution of mass production (1765-1972) from the Deep Transitions perspective. *Technology in Society*, *63*, 101393.

Kirchherr, J. yang, N. H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J. y Hartley, K. (2023). Conceptualizing the circular economy (revisited): An analysis of 221 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, *194*, 107001.

Melendro Estefanía, M. (2010). *Los orígenes "referidos" de la educación ambiental*. https://hemerotecate.fe.ccoo.es/assets/19870409.pdf

Méndez, M. L. (2021). *Procesos de subjetivación: Ensayos entre antropología y educación*. Fundación La Hendija.

Penagos, W. M. M. (2009). Educación ambiental y educación para el desarrollo sostenible ante la crisis planetaria: Demandas a los procesos formativos del profesorado. *Tecné, Episteme y Didaxis (TED)*, (26), 7-35.

Pereira, V. A, da Silva, R. F. y Namara Valdes, A. D. J. (2023). Perspectives on environmental education and environmental justice for a Latin America and the Caribbean post-COVID-19. *Revista Universidad y Sociedad*, *15*(2), 73-81.

Pereira, V. A. y De Azevedo Gibbon, C. (2014). A educação ambiental no ensino: Investigando as abordagens, percepções e desafios na realidade de uma escola pública em Rio Grande (RS). *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, *9*(2), 376-394.

Pereira, V. A., López, C. H., Lotero, W. G., Arévalo, L. T., López, L. M., Guevara, Y. S. ... y Peralta, E. (2019). Una mirada a la educación ambiental y movimientos populares ambientales en América Latina. *Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental*, 6-35.

Pfeffer, D., Reike, D. y Bening, C. R. (2025). Analyzing policy mixes for the circular economy transition: The case of recycled plastics in electronics. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, *56*, 100982.

Quintero Bernate, D. F., Gallego Diaz, F. A., Largo, M. I. y Castañeda Ospina, R. A. (2024). *Memorias vivas: Educación popular y liderazgo social en medio del conflicto colombiano durante los años 1986-2024. Sistematización de experiencias de educación popular.*

Salgado, B. M. C. (2007). Educación ambiental y educación para el desarrollo sostenible en América Latina. *Revista de la Cátedra UNESCO sobre Desarrollo Sostenible*, *1*(1), 29-37.

Svampa, M. y Viale, E. (2020). *El colapso ecológico ya llegó: Una brújula para salir del (mal) desarrollo*. Siglo XXI.

2. Financiamiento para la economía circular en México

Pablo Pérez Akaki[1]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.02

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo realizar una revisión de las opciones de financiamiento en México para impulsar la economía circular, lo cual puede representar un fuerte incentivo hacia la transición productiva para impulsar el desarrollo de nuevos modelos orientados hacia la sostenibilidad. Dadas las preocupaciones respecto a estos temas, por todo el mundo se han hecho esfuerzos muy importantes para insertar los conceptos de sostenibilidad y economía circular como parte de la agenda transversal que alcance a todos los sectores económicos, entre ellos al sector financiero. Por ello en los últimos años se ha visto un gran esfuerzo para crear nuevos productos y mercados financieros que integren esos objetivos sostenibles en la toma de decisiones de las organizaciones. Así, en el documento se explorarán los esfuerzos que ha realizado tanto el sector público como el sector privado por medio del impulso de mercados financieros "verdes" o sostenibles que reconocen este tipo de prácticas y se ofrecen recursos para financiarlos. Si bien el camino es aún largo para lograr un resultado significativo, México ha sido pionero en este tipo de prácticas que son incipientes en América Latina, pero no así en las economías avanzadas y para lograrlo se requerirán mayores esfuerzos desde el sector público con el fin de organizar la transición de muchas empresas hacia estos mercados financieros sostenibles.

[1] Doctor en Geografía. Profesor-investigador en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7250-5855 ; Scopus: 56369088400

Palabras clave: *mercados financieros sostenibles, finanzas sostenibles, bonos sostenibles, financiamiento al desarrollo sostenible.*

La importancia del financiamiento en el impulso a las economías

En la actualidad las finanzas se han vuelto la columna vertebral de las economías, pues permiten el financiamiento a las iniciativas productivas y también son capaces de mejorar las cadenas de valor industriales (Debrah et al., 2022). De hecho, el impulso a los Objetivos de Desarrollo Sostenible son posibles cuando se tienen estrategias de financiamiento que impulse la transición de muchas actividades económicas para ser respetuosas con la sociedad y el medio ambiente, impulsando así el ODS 13 de acción contra el cambio climático, el ODS 7 de energía limpia y asequible, el ODS 12 de consumo y producción responsables, el ODS 9 sobre la industria, innovación e infraestructura, el ODS 11 que habla sobre ciudades y comunidades sostenibles y que, en conjunto, impulsan el ODS 1 que es la reducción de la pobreza.

Uno de los modelos hacia la sostenibilidad es la economía circular, la cual puede definirse como "un modelo económico orientado a la utilización eficiente y el reciclaje de recursos, caracterizado por el bajo consumo, bajas emisiones y alta eficiencia, bajo los principios de reducción de recursos, reuso de productos y reciclaje de desechos" (Xiaofei, 2021). Así mismo, de acuerdo con la Fundación Ellen McArthur la economía circular "es regenerativa y restauradora por estructura, y busca mantener los productos, elementos y sustancias a su máximo valor y precio en todo momento, diferenciando entre las fases biológica y tecnológica" (EMF, 2003). La misma Fundación reconoce que este modelo de economía "está diseñada para eliminar los residuos y la contaminación, circular productos y materiales (en su valor más alto) y regenerar la naturaleza", ofreciendo así mejores resultados para las personas y el medioambiente.

El camino hacia la sostenibilidad y la economía circular requiere grandes inversiones de recursos del sector público por medio de infraestructura verde, subsidios a nuevos productos, investigación y desarrollo e inversio-

nes de capital para la producción, que permitirán detonar las inversiones de capital privado para incrementar la escala y lograr un resultado significativo (Rieradevall y Gasol, 2025). De acuerdo con AlAhbabi y Nobanee (2020) la transición desde la economía lineal hacia la circular requiere inversiones en 4 componentes esenciales: desarrollo de materiales y productos, estrategias de marketing, estructuras organizativas, redes globales inversas y facilitadores.

Sin embargo, el acceso para el financiamiento a la economía circular es limitado y no existen mecanismos de compensación del riesgo que implica la conversión hacia ella. Estas necesidades financieras en la transición implican financiamiento de proyectos de economía circular, impulso a la innovación en la sociedad, desarrollo de nuevos modelos de negocios bajo estos principios, inversiones iniciales necesarias para la transición, así como el impulso a nuevas regulaciones dónde la economía circular tiene aceptación y respaldo (Kumar et al., 2024).

Estas inversiones también se sustentan en las malas experiencias que hasta ahora se han reportado en la economía circular, las cuales se centran en la complejidad de las cadenas de valor, la limitada infraestructura, los retos en la comunicación entre empresas, los límites en la diseminación de la información sobre las innovaciones, entre otros (Gafstrom y Asma, 2021; Lobo et al., 2022).

El financiamiento sostenible y sus dimensiones a escala global

Los mercados financieros en los últimos años han impulsado la creación de nuevos y diversos productos para financiar la transición hacia la economía circular, entre los que se encuentran los bonos verdes, créditos verdes, bonos sostenibles, bonos climáticos, financiamientos colectivos, subsidios, capital de riesgo para proyectos sostenibles, mercados de carbón, incentivos fiscales y finanzas ambientales (Kumar et al., 2024).

De acuerdo con Shoenmaker (2017), las finanzas sostenibles han evolucionado desde una versión 1, en la que se ponían las instituciones ciertas reglas para no invertir en actividades que fueran negativas para la socie-

dad, a una versión 2 en la que, además comenzaron a incluir criterios sociales y ambientales al modelo de partes interesadas *(stakeholder),* para ubicarse actualmente en la versión 3 en la que el concepto de sostenibilidad es trascendental para la toma de decisiones de largo plazo y la creación de valor tanto para las compañías como para la sociedad.

El mayor desarrollo de los mercados financieros sostenibles se tiene en Europa, donde se desarrolló la Plataforma para Finanzas Sostenibles, así como la Plataforma para el Soporte de la Economía Circular, ambas coherentes con la taxonomía sostenible para la Unión Europea.

En el caso de la Plataforma para las Finanzas Sostenibles, sus operaciones comenzaron en 2020 y se trata de un órgano consultivo en materia del financiamiento para proyectos que contribuyen a la sostenibilidad, el cual está formado por expertos en esa materia quienes, entre otras funciones, analizan los flujos financieros que apoyan a proyectos sostenibles para poder ampliar su escala e impactos (UE, 2025).

A escala mundial, un reporte del Global Market Insights (2025) reconoció que el mercado de finanzas sostenibles alcanzó, para el año 2024, el valor de 5.87 trillones de dólares, pronosticando una tasa de crecimiento del 19.8% para el periodo de 2025 a 2034. El tipo de instrumentos que más éxito han logrado son los de renta fija, es decir, los bonos temáticos, que son de menor riesgo, pero también menor rendimiento, que son atractivos para los principales emisores como los gobiernos y bancos de desarrollo, aunque cada vez hay más participación de gobiernos municipales, empresas e instituciones financieras que demandan financiamiento principalmente para proyectos de energía alternativa. Particularmente, en el Reino Unido, los proyectos de economía circular son los que demandan mayor cantidad de recursos de las finanzas sostenibles.

Entre los bonos temáticos, los bonos verdes son los de mayor importancia, seguidos por los bonos sociales y posteriormente los de sostenibilidad. Los bonos verdes son aquellos que se orientan a financiar proyectos con impacto ambiental, por ejemplo, a proyectos de energías alternativas, a reducir la contaminación, etc.; los bonos sociales orientan sus impactos a las personas, enfocándose por ejemplo a educación, salud, vivienda y generación de empleo, entre otros; los bonos de sostenibilidad combinan los dos anteriores, por lo que los impactos se dan en dos dimensiones y pue-

den tener mejores contribuciones a los ODS; finalmente se tienen los bonos vinculados a la sostenibilidad, que difieren en los anteriores en que sus rendimientos se vinculan a los resultados de los impactos en la sostenibilidad, lo cual los hace diferentes a los anteriores (BM, 2024).

Con cifras del 2023, se identificó a Europa como la región de mayor emisión de bonos sostenibles, con 405 billones de dólares; le siguió la región de Asia Pacífico, con 288 billones de dólares y Norteamérica, con 97 billones. América Latina y el Caribe contribuyeron con 54 billones mientras que África apenas sumó 4 billones (BM, 2024).

Otra de las estrategias que se han seguido en los mercados financieros sostenibles son los criterios ASG (Ambiente, Social y Gobernanza, ESG en inglés), que implica un compromiso de las empresas que se traduce en acciones que impulsen la sostenibilidad y le den viabilidad en el largo plazo. Ante este comportamiento de las empresas, los mercados financieros orientan recursos para invertir en empresas que impactan con sus operaciones a la sostenibilidad en sus diferentes dimensiones.

Este tipo de recursos son reportados también en el informe del Banco Mundial (2024) con el título de fondos sostenibles, el cual reconoce que alcanzó un volumen de 3 trillones de dólares en 2023, donde Europa tiene un liderazgo con el 85% del mercado seguido de Estados Unidos con participación del 9%, con una cantidad aproximada de 7.5 mil instrumentos que han sido reconocidos con este modelo. Sin embargo, los especialistas tienen dudas de la transparencia de estos instrumentos y para ello han desarrollado el término *"greenwashing"* para denotar prácticas que aparentan ser sostenibles, pero no lo son en una auditoria.

Por otro lado, el esfuerzo que realiza la Unión Europea por medio de la Plataforma Europea de Partes Interesadas en la Economía Circular (#CEstakeholderEU, 2025), cuenta con diversos instrumentos que apoyan este tipo de iniciativas, por ejemplo el Fondo Europeo de Inversiones (EIF), parte del Banco Europeo de Inversiones, el cual tiene como tarea la provisión de financiamiento a intermediarios financieros para que puedan apoyar a empresas pequeñas y medianas entre los países que forman parte de la UE, cuando se busque financiamiento para proyectos de infraestructura para la economía circular y bioeconomía.

Un segundo instrumento es el Fondo Europeo para la Bioeconomía Circular (ECBF), instrumento diseñado de manera exclusiva para impulsar este tipo de iniciativas desde el Banco de Inversiones Europeo. Este fondo arrancó operaciones en el año 2020 y en una evaluación realizada en 2023 sobre sus impactos se encontró que, desde su fundación, han notado crecimientos en inversiones privadas en capital de riesgo, principalmente en sectores de agricultura, nutrición, empaques, materiales básicos y cuidado personal. El monto que se había recaudado hasta el año 2024 consistía en 300 millones de euros, invertidos en 16 proyectos de startups con 16 empresas de 10 países diferentes y se encontró que su financiamiento impulsó positivamente el crecimiento de las empresas en su fase de expansión (Treperman, 2024).

Los esfuerzos en México por el financiamiento a la sostenibilidad

México ha tenido esfuerzos notables en el impulso a las finanzas sostenibles, al haber desarrollado tempranamente, en respuesta a las importantes condiciones de diversidad biológica y cultural, a las que estudios han demostrado su gran vulnerabilidad al cambio climático y los efectos hidrometeorológicos extremos, teniendo un reconocimiento de vulnerables 1 448 municipios en el país, de un total de 2 471 (INECC, 2021).

El primer esfuerzo por instrumentos financieros relacionados con la sostenibilidad data de 1998 cuando comenzó el mercado de bonos de carbono de manera internacional, aunque en México esto tuvo auge a partir de 2008 (López-Toache et al., 2016). Los bonos de carbono son instrumentos financieros que se intercambian en los mercados pertinentes, diseñados como estrategia para reducir la mitigación de gases de efecto invernadero mediante el uso de mecanismos de desarrollo limpio (MDL), mecanismos de acción conjunta (AC) y el comercio internacional de emisiones (López-Toache et al., 2016; Estrada-Chavira, 2022). Cada bono representa un certificado por una tonelada eliminada o evitada de emisiones de dióxido de carbono equivalente (t CO_2 eq.) (Carbon Neutral, 2021) y su uso está orientado a impulsar la innovación hacia tecnologías limpias y hacia la generación de energías sostenibles.

Un segundo instrumento financiero para impulsar la sostenibilidad es el impuesto al carbono en el país, que es un precio a las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas por una actividad, lo que generaría el incentivo para reducirlas. Para el caso mexicano, los impuestos al carbono existen desde el año 2014 por la autoridad federal y es aplicable a la producción, importación y comercialización de combustibles fósiles destinados a procesos de combustión, exceptuando al gas natural, donde la tasa impositiva se establece basándose en la cantidad de dióxido de carbono que contienen (MéxiCO$_2$, 2023). A partir de ello, 9 entidades han impulsado igualmente impuestos al carbono, no todas actualmente aplicables, para impulsar un esfuerzo adicional a la mitigación contra en cambio climático.

Un tercer esfuerzo de impulso de las finanzas sostenibles es el camino que el país ha emprendido hacia el desarrollo de bonos temáticos, que pueden tener diferentes orientaciones, como bonos sostenibles, sociales, vinculados a la sostenibilidad y azules. El gobierno de México ha tenido un liderazgo en la emisión de este tipo de instrumentos financieros, quien a partir del año 2020 emitió el primer bono soberano por 750 millones de euros a plazo de 7 años, a lo que siguieron varias emisiones posteriores sumando más de 90 emisiones entre 2021 y 2023 (SHCP, 2023). Además de estas, FIRA y Banobras han emitido bonos sostenibles con motivos sociales y ambientales, al igual que instituciones financieras privadas.

De acuerdo con el "Marco de referencia de los bonos soberanos vinculados a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)" emitido por la SHCP en el año 2023, los bonos soberanos para ODS pueden tomar la forma de verdes, sociales u ODS sostenibles y deben estar orientados a gastos de inversiones, fiscales, subsidios, adjudicaciones, créditos, operativos o de intervención enfocados a un conjunto de ODS predefinidos, como se observa en la figura 2.1.

El Consejo Mexicano de Finanzas Sostenibles (2025) en su página de internet publicó información al cierre del 2024 sobre el total de emisiones en el país, reportando 242 emisiones de bonos etiquetados, por un monto total estimado de 1 178 578 millones de pesos acumulado desde el año 2015.

El mismo reporte da cuenta de la amplia diversidad que existe en este tipo de instrumentos una vez que otras emisoras participan. Se identifican

Figura 2.1. *Categorías elegibles para bonos ODS*

Fuente: SHCP (2023a).

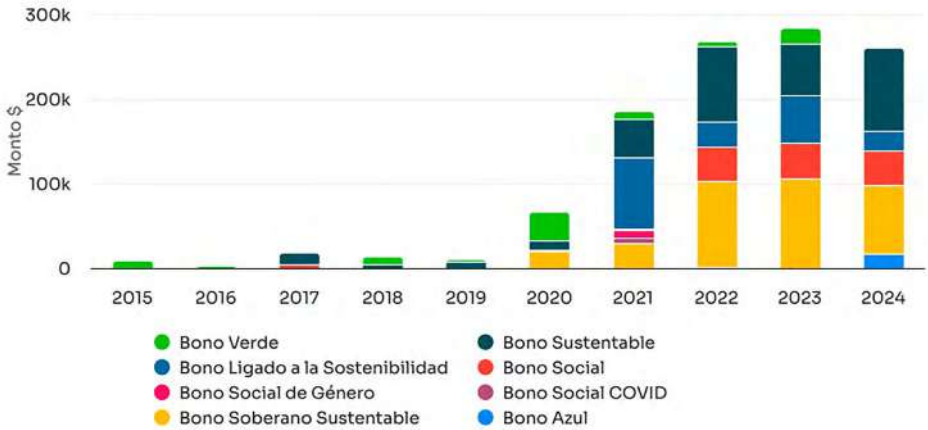
8 diferentes tipos de instrumentos de deuda, desde los bonos verdes, los ligados a la sostenibilidad, los sociales de género, soberano sustentable, sustentable, social, social covid-19 y azul, como se aprecia en la figura 2.2.

Finalmente, la figura 2.3 muestra el comportamiento de los emisores de este tipo de instrumentos, quienes han crecido de manera sostenida en el tiempo y más en esta década. Claramente el Gobierno Federal lidera la emisión de estos instrumentos de deuda, pero es notable el crecimiento de la banca de desarrollo, las paraestatales y el sector privado, representado por banca comercial y corporativos.

En particular, en el caso de la banca de desarrollo del país, la tabla 2.1 muestra la participación de las diferentes instituciones que participan de este subsistema y la cantidad de títulos, así como el monto, en el que han participado en el mercado de bonos sostenibles entre los años 2019 y 2024. Igualmente se presentan los instrumentos emitidos por el gobierno federal y por la CFE.

Un cuarto esfuerzo que ha realizado México para el impulso a las finanzas sostenibles es el correspondiente a la publicación de la Taxonomía Sostenible para México, la cual se define como "un sistema de clasificación que permite identificar y definir actividades, activos o proyectos de inver-

Figura 2.2. *Monto total anual emitido por tipo de bono, cifras en millones de pesos*



Fuente: CMFS (2025).

Tabla 2.1. *Bonos sostenibles emitidos por Gobierno Federal y Banca de desarrollo, 2019 a 2025*

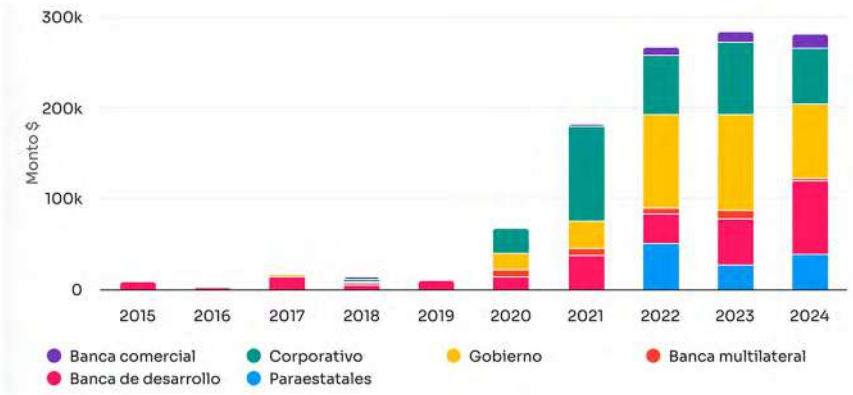
Institución	*Bonos emitidos*	*Monto total (mdp)*	*Objetivos*	*Temas de género/social*
Gobierno Federal	17	$408 460.00	ODS, Infraestructura, Salud	Sí
FIRA	12	$32 495.00	Verde, Azul, Genero Social	Sí
NAFIN	19	$83 953.10	Social, Sustentable, Verde	Sí
NAD-Bank	3	$478.00	Verde	No
Bancomext	16	$69 768.80	Sustentable	No
Banobras	18	$62 281.10	Sustentable	No
CFE	19	$58 248.07	Verde, Social, Sustentable	Sí

Fuente: adaptado de SHCP (2023b) y actualizado de las instituciones correspondientes.

sión con impactos medioambientales y sociales positivos, con base en metas y criterios establecidos" (SHCP, 2023a), con el objetivo de dar certidumbre a los mercados financieros sostenibles, pues ofrece claridad sobre qué actividades realmente contribuyen a la sostenibilidad para que las instituciones financieras puedan canalizar recursos con claridad y certidumbre de sus impactos ambientales y sociales.

Los objetivos definidos en la Taxonomía sostenible de México fueron ambientales y sociales, como se presentan en la tabla 2.2, aunque en una

Figura 2.3. *Monto total anual emitido por tipo de emisor, cifras en millones de pesos*



Fuente: CMFS (2025).

Tabla 2.2. *Objetivos de la taxonomía sostenible de México*

Medioambientales	***Sociales***
▪ Mitigación del cambio climático ▪ Adaptación del cambio climático ▪ Gestión de recursos hídricos y marinos ▪ Conservación de ecosistemas y biodiversidad ▪ Impulso a la economía circular ▪ Prevención y control de la contaminación	▪ Contribución a la igualdad de género ▪ Acceso a servicios básicos relacionados con las ciudades sostenibles ▪ Salud ▪ Educación ▪ Inclusión financiera

Fuente: SHCP (2023a).

priorización de tres objetivos para una primera etapa se eligieron mitigación y adaptación al cambio climático, ciudades sostenibles e igualdad de género. Estos se orientaron a los sectores económicos de agricultura, cría y explotación de animales y aprovechamiento forestal; generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica y suministro de agua; construcción; industrias manufactureras; transporte; y manejo de residuos y servicios de remediación.

Los resultados esperados de la taxonomía sostenible, declarados por la misma SHCP (2023a), son la movilización y reorientación de recursos públicos y privados hacia actividades económicas con impactos positivos medioambientales y sociales, provisión de mejor información sobre estas actividades para evitar el lavado verde *(greenwashing),* cuantificar mejor los flujos financieros hacia estas actividades e impulsar las políticas públicas hacia esta especialidad del sector financiero.

La Taxonomía Sostenible de México es particularmente relevante para la economía circular pues la incorpora de manera directa en el "daño no significativo" de las actividades contenidas en ella, como un conjunto de criterios medioambientales para reconocer que una actividad económica con "efectos sustanciales" no tenga efectos negativos indirectos en otros objetivos de la misma taxonomía. Así, como se muestra en la tabla 2.3, se tiene especificación de lo que se espera en cada uno se los sectores y actividades económicas que han sido incorporadas a la taxonomía en su primera fase referente a su relación con la economía circular.

Como ejemplo de este impulso a la economía circular, en el rubro correspondiente al subsector agrícola se propone el uso de modelos alternativos de producción sostenibles apropiados a las condiciones geográficas y culturales, el uso de energías renovables,

Como es el objetivo, la definición de la taxonomía permite entonces clarificar al sector financiero la importancia de estas inversiones en las empresas, que busquen reducir las dudas respecto a los beneficios que implica destinar recursos a la economía circular. Por lo tanto, la expresión de este tipo de actividades debe ser una guía clara para impulsarla en la economía nacional y así ampliar su conocimiento entre las empresas del país.

Pendientes en la agenda de financiamiento a la economía circular en México

Las autoridades mexicanas han reconocido que para impulsar la agenda sostenible en el país se requieren inversiones de 1.7 billones de pesos anuales, equivalentes al 5.4% del PIB de 2023, de los cuales menos del 10% podría ser provisto por el sector público (SHCP, 2023b). Esto implica que el resto debería ser financiado por el sector privado.

Tras la publicación de la Taxonomía Sostenible de México se han realizado pruebas en un conjunto de 10 instituciones del sector de la banca comercial, de desarrollo, fondos de inversión, aseguradoras, emisoras y AFORE, quienes representan conjuntamente el 94% de los activos del sistema financiero. Se evaluaron 96 operaciones de las cuales apenas 3 cumplieron con los requisitos completos, mientras el 13.5% cumplieron con

Tabla 2.3. *Economía circular en la taxonomía sostenible de México*

Objetivo	*Sector económico*	*Subsector económico*	*Daño no significativo - Criterio de economía circular*
		Subsector agrícola	Todas las actividades económicas del subsector agricultura deberán incluir los siguientes lineamientos: • Uso eficiente de los recursos naturales. • Implementación de nuevos modos de producción sostenibles, como son la concordancia de los cultivos con la topografía, tipo de suelo y condiciones climáticas de la región, rotación de cultivos y la policultura. • Emplear fuentes de energía no renovables. • Reducción de residuos y restricciones en la extracción de nuevos materiales, utilizando materias primas que permitan su correcto aprovechamiento en términos de durabilidad y de posibilidades de reparación, actualización, reutilización o reciclado. • Introducción de nuevas tecnologías para la incineración de residuos peligrosos no reciclables. • Fomentar el consumo de productos locales y de temporada
Mitigación del cambio climático	2.1 Agricultura, cría y explotación de animales, y aprovechamiento forestal	Aprovechamiento forestal	Todas las actividades económicas del subsector aprovechamiento forestal deberán incluir los siguientes lineamientos: • Las cadenas de valor de productos maderables que integran productos al final de su vida útil promueven la economía circular, ya que los residuos maderables pueden ser revalorizados como productos secundarios o reciclados para la generación de biomasa y composta. • Las actividades económicas consistentes con el Manejo Forestal Sustentable fomentan la economía circular al optimizar el aprovechamiento de los materiales, en tanto que no se disminuye o pone en riesgo la capacidad productiva de los ecosistemas y recursos existentes en los mismos.
		Cría y explotación animal	Todas las actividades económicas del subsector —cría y explotación animal— deberán incluir los siguientes lineamientos: • Favorecer acciones y prácticas que disminuyan los efectos de las actividades desarrolladas en las cadenas productivas y de valor sobre el medio ambiente, a través de los siguientes aspectos medioambientales clave: – Utilizar residuos y subproductos y cualquier otra medida para minimizar el uso de materias primas primarias por unidad de producción, incluida la energía. – Minimizar la pérdida de nutrientes del sistema de producción en el medio ambiente. El desarrollo de mercados locales y regionales fomenta el consumo y disminuye impactos por uso de energía para traslados y reparto de productos. – Hacer eficiente el uso de materiales y recursos naturales, como las fuentes de energía no renovables, las materias primas, el agua o el suelo en una o varias fases del ciclo de vida de los productos, en particular en términos de durabilidad y de posibilidades de reparación, actualización, reutilización o reciclado de los productos, minimiza la generación de residuos y realiza un adecuado manejo de ellos.

	2.2 Generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, suministro de agua al consumidor final		Sección A.5 Todas las actividades económicas del sector energía deberán incluir los siguientes lineamientos: • Identificar el tipo de residuos generados durante las diferentes fases del proyecto, estimando el volumen que pudiera generarse. • Identificar y reportar la disponibilidad de servicios de infraestructura para el manejo y disposición final de los residuos, en la localidad y/o región, tales como: rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, servicios de separación, manejo, tratamiento, reciclamiento o confinamiento de residuos, entre otros. En caso de hacer uso de ellos indicar si estos servicios son suficientes para cubrir las demandas presentes y futuras del proyecto y de otros proyectos presentes en la zona. • Con base a la estimación de vida útil del proyecto, se presentará un programa para el desmantelamiento y abandono, que incluya los procedimientos, manejo y destino de materiales y equipos y los programas de rehabilitación o restauración de los sitios. En esta fase se deben considerar las acciones ambientales planteadas en la MIA como medidas de mitigación y que continuarán ejecutándose después de concluida la vida útil del proyecto. Sección B.5 Las siguientes actividades deberán incluir los lineamientos señalados en la Sección A.5, más los incluidos en la presente sección: 221112. Generación de electricidad a partir de energía hidráulica • Asegurarse de que las instalaciones de la central hidroeléctrica hayan sido diseñadas y fabricados para una alta durabilidad, fácil desmontaje, restauración y reciclaje. • Asegurarse de la reparabilidad de las instalaciones de la central hidroeléctrica gracias a la accesibilidad e intercambiabilidad de los componentes. Sección C.5 Las siguientes actividades deberán incluir los lineamientos señalados en la Sección A.5, más los incluidos en la presente sección: 221113. Generación de electricidad a partir de energía solar (sistemas fotovoltaicos) • Garantizar que los paneles fotovoltaicos y los componentes asociados han sido diseñados y fabricados para ofrecer una gran durabilidad, facilidad de desmontaje, reacondicionamiento y reciclaje.
	2.3 Construcción		Sección A.5 Las siguientes actividades deberán incluir los lineamientos señalados en la presente sección: 236111. Edificación de vivienda unifamiliar (construcción de vivienda nueva). 236111. Edificación de vivienda unifamiliar (renovación de vivienda existente). 236112. Edificación de vivienda multifamiliar (construcción de vivienda nueva). 236112. Edificación de vivienda multifamiliar (renovación de vivienda existente). 236221. Edificación de inmuebles comerciales y de servicios, excepto la supervisión (construcción de nuevos inmuebles).

			236221. Edificación de inmuebles comerciales y de servicios, excepto la supervisión (renovación de inmuebles). • Cumplimiento de la NMX-AA-164-SCFI-2013 - Edificación Sustentable - Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos en las secciones: • 5.2.4.13: El manejo de los residuos generados durante la construcción del edificio debe sujetarse a la normatividad local y federal en materia de manejo integral. • 5.2.4.14: Se debe hacer una selección de los residuos generados durante la obra, separando los residuos en aquellos que pueden ser reutilizados, los reciclables, los no reutilizables ni reciclables y los residuos tóxicos o peligrosos. Sección B.5 Las siguientes actividades deberán incluir los lineamientos señalados en la presente sección: 236111. Edificación de vivienda unifamiliar (construcción de vivienda nueva). 236111. Edificación de vivienda unifamiliar (renovación de vivienda existente). 236112. Edificación de vivienda multifamiliar (construcción de vivienda nueva). 236112. Edificación de vivienda multifamiliar (renovación de vivienda existente). • Cumplimiento de Código de Edificación de Vivienda (CEV) en sus secciones: • 3105.2.1: Gestión de residuos. Sección C.5 Las siguientes actividades deberán incluir los lineamientos señalados en la presente sección: 238222. Instalaciones de sistemas de aire acondicionado y calefacción. • Se deberá de demostrar tener un plan de manejo de refrigerantes de acuerdo con la NOM-161-SEMARNAT-2011 para la limpieza y reúso de refrigerantes de los sistemas de enfriamiento y calefacción. Sección D.5 Las siguientes actividades deberán incluir los lineamientos señalados en la presente sección: 237312. Construcción de carreteras, puentes y similares. 237993. Construcción de obras para transporte eléctrico y ferroviario. • Identificar el tipo de residuos generados durante las diferentes fases del proyecto, estimando el volumen que pudiera generarse. • Con base a la estimación de vida útil del proyecto, se presentará un programa para el desmantelamiento y abandono, que incluya los procedimientos, manejo y destino de materiales y equipos y los programas de rehabilitación o restauración de los equipos. • Identificar y reportar la disponibilidad de servicios de infraestructura para el manejo y disposición final de los residuos, en la localidad y/o región, tales como: rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, servicios de separación, manejo, tratamiento, reciclamiento o confinamiento de residuos, entre otros. En caso de hacer uso de ellos indicar si estos servicios son suficientes para cubrir las demandas presentes y futuras del proyecto y de otros proyectos presentes en la zona.

	2.4 Industrias manufacture-ras		Fabricación de cemento y productos a base de cemento (327310) Cambio en la composición del cemento usando productos secundarios derivados de desechos o subproductos de empresas cercanas. Extensión de la vida útil de construcciones, mejorando su resistencia estructural. Captura de carbono en residuos del cemento. Sustitución parcial del clínker con subproductos industriales reactivos en medios alcalinos (materiales cementosos suplementarios). Promoción del reaprovechamiento de residuos de construcción y demolición urbanos. Mapeo del flujo de materias primas, energía y residuos para identificar beneficios de la circularidad durante el ciclo de vida de la infraestructura. Complejos siderúrgicos (331111) e Industria básica del aluminio (331310) Diseño y construcción de plantas con alta durabilidad, desmontaje fácil, restauración y reciclaje. Identificación de tipos y volúmenes estimados de residuos generados durante el proyecto. Evaluación de la infraestructura disponible local/regional para manejo de residuos (rellenos sanitarios, plantas de tratamiento, servicios de reciclaje, etc.) y verificación de su capacidad para cubrir demandas actuales y futuras. Fabricación de gases industriales (325120), productos químicos inorgánicos (325180) y orgánicos (325190) Tratamiento de residuos y subproductos conforme a la jerarquía de residuos, priorizando el reciclaje en ciclo cerrado dentro del mismo proceso. Industria básica del aluminio (331310) Control de residuos y productos generados en las operaciones de coque y fundición (incluyendo alquitrán y benzola).
	2.5 Transporte		Todas las actividades económicas del sector transporte Identificación de tipos y volúmenes de residuos generados en cada fase del proyecto. Verificación de disponibilidad de infraestructura local/regional para la gestión de residuos (rellenos sanitarios, plantas de tratamiento, reciclaje, etc.) y evaluación de su capacidad frente a la demanda actual y futura. Consideración de la chatarrización de vehículos, cuando aplique. En transporte de pasajeros: mejora del reparto modal y manteniiento del número de pasajeros (eficiencia en ocupación). Aplicación de medidas de gestión de residuos conforme a la LGPGIR y demás normativa aplicable. Presentación de un programa de desmantelamiento y abandono con procedimientos para el manejo y destino de materiales/equipos y acciones de rehabilitación o restauración al final de la vida útil del proyecto. Transporte por ferrocarril-mercancías (482110)

			Consolidación de envíos, mejora de eficiencia en la última milla y calendarización de entregas. Desarrollo de sistemas logísticos abiertos y globales, integrando información en tiempo real para mejorar la eficiencia a nivel sistema.
	2.6 Manejo de residuos y servicios de remediación		Recolección y recuperación de residuos (sector público y privado) Códigos: 562121, 562122, 562921, 562922 Establecimiento y mantenimiento de prácticas de recolección de RSU (residuos sólidos urbanos) y RME (residuos de manejo especial) que permitan: Identificar tipos de residuos. Cuantificarlos adecuadamente. Asegurar que los componentes y materiales mantengan su utilidad y valor máximo. Fomento de prácticas para Desmontaje de productos. Reutilización bajo esquemas de economía colaborativa. Remanufactura, reciclaje y recuperación de productos. Tratamiento, disposición final y remediación de residuos (sector público y privado) Códigos: 562222, 562221, 562911, 562912 Implementación de tecnologías como digestión anaeróbica y compostaje, que permiten: Aprovechamiento de la FORSU (fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos). Contribuir al modelo de economía circular mediante la valorización de residuos orgánicos. Desarrollo de nuevas tecnologías de generación de energía a partir de residuos.
Adaptación al cambio climático			Todas las actividades económica del subsector agricultura deberá incluir los siguientes lineamientos: • Uso eficiente de los recursos naturales. • Implementación de nuevos modos de producción sostenibles, como son la concordancia de los cultivos con la topografía, tipo de suelo y condiciones climáticas de la región, rotación de cultivos y la policultura. • Emplear fuentes de energía no renovables. • Reducción de residuos y restricciones en la extracción de nuevos materiales, utilizando materias primas que permitan su correcto aprovechamiento en términos de durabilidad y de posibilidades de reparación, actualización, reutilización o reciclado. • Introducción de nuevas tecnologías para la incineración de residuos peligrosos no reciclables. • Fomentar el consumo de productos locales y de temporada. Las actividades económicas del sector manufacturas deberá incluir los siguientes lineamientos: • Asegurarse de que las instalaciones y plantas siderúrgicas hayan sido diseñadas y construidas para una alta durabilidad, fácil desmontaje, restauración y reciclaje. • Identificar el tipo de residuos generados durante las diferentes fases del proyecto, estimando el volumen que pudiera generarse. • Identificar y reportar la disponibilidad de servicios de infraestructura para el manejo y disposición final de los residuos, en la localidad y/o región, tales como: rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, servicios de separación, manejo, tratamiento, reciclamiento o confinamiento de residuos, entre otros. En caso de hacer uso de ellos indicar si estos servicios son suficientes para cubrir las demandas presentes y futuras del proyecto y de otros proyectos presentes en la zona.

Perspectiva de género			Para las actividades que aún no cuentan con criterios de NDS para esta primera etapa, se deberá demostrar, mediante la acreditación de seguimiento a normas o regulación nacional o estándares internacionales aplicables, certificaciones especializadas, emisión de una segunda opinión o evaluación de impacto, que la operación de la organización o proyecto de inversión no genera impactos negativos a los seis objetivos medioambientales de la Taxonomía. Los criterios generales presentes en la Taxonomía a los cuales se puede aplicar son los siguientes: • Identificar el tipo de residuos generados durante las diferentes fases del proyecto, estimando el volumen que pudiera generarse. • Reportar la disponibilidad de servicios de infraestructura para el manejo y disposición final de los residuos en la localidad y/o región, tales como: rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, servicios de separación, manejo, tratamiento, reciclaje o confinamiento de residuos. En caso de hacer uso de ellos, indicar si estos servicios son suficientes para cubrir las demandas presentes y futuras del proyecto y de otros proyectos presentes en la zona. • Presentar un programa para el desmantelamiento y abandono del proyecto, considerando la estimación de vida útil. Este programa deberá incluir procedimientos, manejo y destino de materiales y equipos, así como los programas de rehabilitación o restauración de los sitios. • Favorecer acciones y prácticas que disminuyan los efectos de las actividades desarrolladas en las cadenas productivas y de valor sobre el medio ambiente, mediante el uso de residuos, subproductos y cualquier otra medida que minimice el uso de materias primas primarias por unidad de producción, incluida la energía. • Considerar medidas para gestionar los residuos de la actividad, de conformidad con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y la normativa aplicable.

Fuente: SHCP (2023a).

algunas de las características, siendo los requisitos más comunes faltantes las pruebas del daño no significativo (SHCP, 2023c). La regulación también resultó una tarea pendiente, pues a pesar de que en muchas de las instituciones ya existe un camino recorrido en términos de sostenibilidad, la manera en la que comunican sus avances no permite comparaciones ni claridad sobre el avance que tiene cada una de ellas respecto a esta taxonomía.

Desde la estrategia de movilización de del financiamiento sostenible se definió igualmente el desarrollar una hoja de ruta "para analizar el marco fiscal vigente y en su caso adaptarlo para promover cadenas productivas que estén alineadas con la economía circular" (SHCP, 2023b). Desafortunadamente, no hay más menciones en la estrategia, lo cual deja ver que la importancia de este tipo de economía es incipiente y requiere mucho avance en su profundización teórica, conceptual y metodológica para poder influir verdaderamente en la atracción de recursos del sector privado para cerrar la brecha de financiamiento requerido para las metas de sostenibilidad a las que el país se comprometió.

Así, la estrategia de movilización identifica las siguientes rutas para impulsar el financiamiento de la sostenibilidad en el país:

a) *Pilar 1: Gestión financiera sostenible.* Consiste en la adaptación de las prácticas, marcos y sistemas de gestión para integrar una perspectiva sostenible.
b) *Pilar 2: Movilización de financiamiento sostenible.* Incentivar al sector privado a participar del financiamiento sostenible, lo que se ha logrado con el desarrollo de instrumentos y mercados sostenibles, entre otros aspectos.
c) *Pilar 3: Acciones transversales.* Que deben ser comunes a todas las iniciativas anteriores, entre las que se encuentran la perspectiva de género, creación y fortalecimiento de capacidades sobre financiamiento sostenible y acciones de seguimiento y monitoreo de la estrategia.

Esta ruta implica que la economía circular puede tener un impulso muy importante, siendo un recurso muy valioso para apoyar la transición hacia una economía con menores emisiones de carbono, con nuevos instrumentos de financiamiento para impulsar dicha transformación y con

una alineación de los esfuerzos públicos y privados hacia una economía sostenible. Sin embargo, en México se requiere un mayor y decidido impulso a la economía circular, que tras la publicación de la Ley General de Economía Circular en México en 2023, la cual ha cobrado relevancia en 7 entidades que han publicado leyes locales sobre economía circular (Ciudad de México, Querétaro, Baja California, Estado de México, Guanajuato, Morelos y Oaxaca).

Una evaluación sobre el grado de circularidad de la economía mexicana identificó que a nivel de país se tiene un porcentaje de circularidad del 15.14%, mientras que Países Bajos tiene el liderazgo con un 24.5%, aunque por producto las brechas entre el potencial de materiales recuperables y los recuperados son muy amplias aún (Sandoval-García, Ramos y Correa, 2023). La Semarnat (2024) además reconoció que apenas el 0.4% de los materiales de la economía logran reciclarse o reutilizarse, cuando a nivel global esta cifra está en 7.2%.

Esto quiere decir que existen grandes áreas de oportunidad para impulsar la economía circular en el país, pero se requiere un esfuerzo conjunto y coordinado mayor para lograrlo. Si bien en el Plan Nacional de Desarrollo se ha establecido un compromiso formal por el impulso de este tema en la economía mexicana, es importante dotarlo de herramientas financieras para que se pueda pasar de los compromisos a las acciones y luego a los resultados.

Referencias

Banco Mundial. (2024). *World Investment Report*. Banco Mundial. https://unctad.org/topic/investment/world-investment-report

Carbón Neutral. (2021). *¿Qué son los bonos de carbono y cómo funcionan?* https://www.carbonneutralplus.com/preguntas-frecuentes/

CMFS. (2025). *Bonos MX: Mercado de deuda etiquetada en México.* https://cmfs.org.mx/bonos-mx/

Debrah, C., Chan, A. P. C. y Darko, A. (2022). Green finance gap in green buildings: A scoping review and future research needs. *Building and Environment, 207,* 108443. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108443

EMF. (2013). Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology, 2*(1), 23-44.

Estrada-Chavira, M. E. (2022). Evolución y controversias de los bonos de carbono en México. *Semestre Económico*, *11*(1), 127-133.

European Commission. (2025). *Platform on sustainable finance*. https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/overview-sustainable-finance/platform-sustainable-finance_en

Global Market Insights (GMI). (2025). *Sustainable finance market size*. https://www.gminsights.com/industry-analysis/sustainable-finance-market

nstituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2021). *Municipios vulnerables al cambio climático: Atlas nacional de vulnerabilidad al cambio climático*. https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/conten_intro/Mpos_Vulnerables_priorizacion_ANVCC.pdf

Kumar, B., Kumar, L., Kumar, A., Kumari, R., Tagar, U. y Sassanelli, C. (2024). Green finance in circular economy: A literature review. *Environment, development and sustainability, 26*(7), 16419-16459.

López-Toache, V., Romero-Amado, J., Toache-Berttolini, G. y García-Sánchez, S. (2016). Bonos de carbono: Financiarización del medioambiente en México. *Estudios Sociales, 25*(47), 189-214.

MéxiCO_2. (2023). *Impuestos al carbono en México: Desarrollo y tendencias*.

Rieradevall Pons, J. y Gasol, C. (2025). *Economía circular: El camino hacia la sostenibilidad*. Universitat Autònoma de Barcelona.

Sandoval-García, E., Ramos Rodríguez, G. G. y Correa Torres, A. (2023). Midiendo la economía circular en México. *Realidad, Datos y Espacio: Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 14(1), 38-53.

Schoenmaker, D. (2017). *From risk to opportunity: A framework for sustainable finance*. Erasmus University, Rotterdam School of Management.

Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). (2023a). *Taxonomía sostenible de México*.

Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). (2023b). *Estrategia de movilización del financiamiento sostenible*. https://www.gob.mx/shcp/documentos/documento-de-consulta-de-la-estrategia-de-movilizacion-de-financiamiento-sostenible?state=published

Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). (2023c). *Reporte de resultados y recomendaciones del Programa Piloto de la Taxonomía Sostenible*. https://www.finanzassostenibles.hacienda.gob.mx/work/models/finanzassostenibles/recursos/documentos/taxonomia/Resultados_Programa_Piloto_TSM.pdf

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2024). *Bases para la elaboración de un diagnóstico de la Estrategia Nacional de Economía Circular de México*. México: Semarnat.

Treperman, J. et al (2024). *Impact evaluation on the European Circular Bioeconomy Fund. Final report*. https://www.ecbf.vc/pr-ecbf-impact-evaluation-report

Xiaofei, Y. (2022). Research on the action mechanism of circular economy development and green finance based on entropy method and big data. *Journal of Enterprise Information Management*, *35*(4/5), 988-1010.

#CEstakeholderEU. (2025). *European circular economy stakeholder platform*. https://circulareconomy.europa.eu/platform/en

3. Impulso de la economía circular a través de acciones de educación ambiental en un asentamiento irregular de Chilpancingo, Guerrero, México

Uriel Winston Cabrera Tena[1]
María Concepción López Ojeda[2]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.03

Resumen

El deterioro ambiental provocado por el consumismo y la inadecuada o nula disposición final de los residuos sólidos urbanos, tanto por parte de los consumidores como de los gobernantes, ya sea por inexperiencia o por la omisión de políticas públicas adecuadas, ha llevado a un aumento de esta problemática. El municipio de Chilpancingo ha enfrentado esta situación durante más de diez años, en la actualidad es más notoria la necesidad de generar acciones que impulsen y desarrollen estrategias para adoptar un modelo de economía circular. Por lo que el siguiente trabajo describe las acciones que se han generado a través de la educación ambiental dentro del municipio, poniendo como eje rector el trabajo realizado en un asentamiento irregular conocido como Colonia Nueva Esperanza, ubicado en la periferia. Se destaca que estos asentamientos irregulares son áreas de gran vulnerabilidad, no solo ambiental y ecológica, sino también económica, social, política, física, entre otras. Esto nos brinda la oportunidad de buscar herramientas para implementar modelos de economía circular y, a través de ellos, transformar los espacios, visiones e ideas.

[1] Maestro en Gestión para el Desarrollo Sustentable. Docente en la Universidad Virtual del Estado de Guerrero, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1139-9301
[2] Doctorante en Estudios Sociales y Territoriales por la Universidad Autónoma de Guerrero, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7353-5457

Palabras clave: *residuos sólidos urbanos, asentamientos irregulares, economía circular, educación ambiental.*

Introducción

El deterioro ambiental a causa de las acciones del consumismo, mala o nula disposición final de los residuos sólidos urbanos por los consumidores y gobernantes, ya sea por inexperiencia u omisión de las políticas públicas adecuadas, conlleva a que la problemática se acrecenté. Si bien, el municipio de Chilpancingo de los Bravo ha acarreado por más de 10 años esta situación, en la actualidad es más notorio la necesidad de generar acciones que impulsen y desarrollen estrategias para introducir un modelo de economía circular.

En Chilpancingo no se cuenta con un relleno sanitario sino con un basurero a cielo abierto, el cual ha venido generando serias problemáticas de contaminación y la "vida útil" de las celdas que lo conforman han sobrepasado el nivel recomendado, por lo que es necesario generar acciones que permitan tener un adecuado manejo de los residuos.

El manejo de los residuos sólidos urbanos en Chilpancingo no ha existido en su formalidad, si bien hay recolección de estos por parte del municipio y de la iniciativa privada, no ha sido gestionada de la forma correcta. Por un lado el sector social no realiza una correcta separación de los residuos, en el caso de quienes llevan a cabo esta separación se enfrentan con la entrega de los residuos clasificados a los recolectores, quienes no hacen una separación adecuada, debido a que la mayoría de estos recolectores se basan principalmente en el residuo que les genere una ganancia monetaria —siendo su principal interés la separación del PET y cartón, por su valorización en el mercado—, lo que contribuye a que, de manera general, no se realice una separación correcta y, en consecuencia, llegue una mayor cantidad de residuos al basurero a cielo abierto.

Hasta el año 2022 la Secretaría de Desarrollo Urbano Recursos Naturales y Ecología del Municipio de Chilpancingo de los Bravo (SEDURNE, como se cita en López, 2023), indicaba que dentro de la ciudad de Chilpancingo se tenía registro de 675 asentamientos, de los cuales: 592 se encontraban regularizados ante el municipio y 83 con carácter de irregulares.

Esto genera una preocupación aún mayor ya que, como es bien sabido, los asentamientos irregulares carecen de los servicios públicos básicos que el H. Ayuntamiento tiene la responsabilidad de proporcionar para satisfacer las necesidades de sus habitantes. De acuerdo con los datos anteriores, nos generamos la pregunta ¿Qué sucede con los residuos generados por los asentamientos irregulares? por lo que, desde Biólogos por el Ambiente y la Actualización Educativa A. C. (BIOAAE), impulsamos visitas, recorridos en el territorio y acciones que promovieran la gestión de los residuos sólidos urbanos a través de la Educación Ambiental, realizamos en conjunto con los habitantes de estos asentamientos: talleres, charlas y presentación de videos o documentales, donde se les mostrara la importancia del buen manejo de los residuos.

En el presente trabajo nos basamos en el asentamiento irregular "Nueva Esperanza", ubicado en la periferia de la ciudad de Chilpancingo, con el objetivo de promover una economía circular a través de los residuos sólidos urbanos para el mejoramiento del asentamiento, siendo impulsado a partir de una gestión popular de los residuos, donde los principales actores sean los habitantes del asentamiento, promoviendo el fortalecimiento de los procesos de gestión de Residuos Sólidos Urbanos y la responsabilidad compartida, con la finalidad de disminuir la generación de problemáticas ambientales dentro de los asentamientos regulares o irregulares, a causa de la ineficacia de la administración municipal por implementar estrategias que promuevan el correcto manejo de estos RSU.

Asentamiento irregular

Si bien no existe una definición técnica ni legal de qué se entiende por asentamiento «irregular», «precario» o «informal», estos términos se han vuelto cotidianos en tiempos recientes: en primer lugar, porque su número, más allá de las definiciones, ha crecido de manera muy fuerte, y en segundo lugar porque también ha crecido fuertemente el interés que la sociedad pone en ellos: desde los círculos académicos hasta los partidos políticos. (Nahoum, 2011).

De acuerdo con lo establecido en el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en el país hay tres tipos de tenencia de la tierra: la propiedad privada, la propiedad social (ejidal o comunal) y la propiedad pública. Desde esta perspectiva, en el documento "Tenencia de la tierra, derechos a la vivienda y Género: Marco nacional y urbano: México" (ONU-Hábitat, 2005), propone una clasificación de la informalidad a partir de los procesos de ocupación de suelo por tipo de tenencia de la tierra. Esta aproximación estaría reconociendo que los procesos de ocupación irregular tienen sus propias particularidades según el tipo de propiedad, con dinámicas subyacentes que definen y caracterizan a los asentamientos irregulares. No obstante, esta clasificación no dimensiona de manera adecuada la normativa de suelo como característica determinante de la irregularidad de un asentamiento en el contexto mexicano. Esto hace eco con lo planteado por Connolly (2012), respecto a que la regularidad es mucho más que contar con un título de propiedad, pues también hace referencia al apego de la normativa del suelo. (Tomado de Varela, 2025).

Por lo que, para propósitos de la presente investigación, definimos a un asentamiento irregular como un espacio carente de legitimidad legal, así como de los servicios públicos básicos con los que cuenta un asentamiento formal, como lo son: agua potable, drenaje, alcantarillado, energía eléctrica, así como la recolección de residuos. Esto basándonos en literatura y en los recorridos realizados por la ciudad y percatándonos que estas son las principales carencias que observamos dentro de los asentamientos, sumando que se encuentran en zonas de riesgo y que no cuentan con las condiciones adecuadas de accesos.

Gestión popular de residuos sólidos urbanos

Cuando hablamos de gestión nos referimos a la forma de como realizaremos alguna acción o actividad que conlleve una planificación o estrategia para un buen funcionamiento a la hora de actuar. Respecto al tema de los Residuos Sólidos Urbanos, se habla de una gestión integral, los que significa que,

en la mayoría de las ocasiones, se conjunta a la acción de algún organismo de gobierno, privado y de la sociedad para poder generar el resultado esperado, pero regularmente es mayor el involucramiento institucional.

Sin embargo, cuando introducimos la Gestión Popular hacemos referencia a que es un método de organización social para planear, construir y accionar alternativas que permitan la participación y cooperación colectiva para satisfacer las necesidades de manera sostenible y, con ello, fortalecer la comunalidad a través de la solidaridad, los valores y el trabajo en equipo. Estas bases formulan una buena relación entre RSU y sociedad, lo que permite el impulso de la economía circular, que tiene como objetivo el aprovechamiento de los residuos a través de la reutilización y el reciclaje que da pie a la reparación y renovación, permitiendo un mayor beneficio al otorgar un valor agregado.

Para fortalecer el concepto de Gestión Popular de Residuos, de acuerdo con Paulo Freire (como se cita en Torres, 1986), la participación popular significa una propuesta educacional de apertura, de redefinición de los actores sociales y sus funciones, que rompe con las formas tradicionales de educación, con las estructuras y la institucionalidad establecida, así como también impone una nueva distribución del poder del pueblo y del acceso público y participativo.

Por lo que, enlazando la propuesta de Freire sobre la educación popular con la gestión de residuos sólidos urbanos, partimos desde la visión de promover una cultura ambiental que permita crear una identidad colectiva, lo que derive a que mediante las buenas prácticas ambientales se desarrollaren nuevos procesos de aprendizaje social, que permiten dar paso a las bases de la educación popular como herramientas que agrupan las vivencia, la experiencia, los aprendizajes de la cotidianidad, de las potencialidades de cada sujeto participante desde los diferentes compromisos que asume en la sociedad, ya que la educación popular debe ser entendida como un proceso sistemático de participación y formación mediante la instrumentación de prácticas populares y culturales tanto en los ámbitos públicos como privados (Torres, 1986).

Economía circular

La economía circular actualmente es un concepto que busca establecer no solo una moda o un destello de acción por querer hacer algo por las circunstancias actuales del medio ambiente, este concepto va más allá de solo ver al futuro para construir la sostenibilidad, sino que es voltear al pasado y realizar una amplia observación que nos permita reflexionar sobre qué es lo que se ha estado haciendo bien o mal y partir de allí para formular estrategias que den resultados positivos, la economía circular se ha realizado desde mucho tiempo atrás con la visión de una producción y consumo responsable y dándole un valor añadido a los residuos, esto de acuerdo a la definición del Parlamento Europeo (2021):

> La economía circular es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido. De esta forma, el ciclo de vida de los productos se extiende.

Si bien, claro está que no todos han optado por estas posturas y por ello vemos ahora las consecuencias plasmadas en el ambiente y mencionamos que este concepto ha sido utilizado desde tiempo atrás; actualmente se está impulsando a que se realice con mayor exigencia, no solo para un sector determinado de la sociedad, como se ha realizado, si no que se han creado compromisos por las naciones, gobiernos y sociedad en general para visualizar cambios efectivos en un pronto futuro para dejar de lado el sistema de producción y consumo tradicional en el cual solo se basa en la utilización y el desecho de manera irracional.

Educación ambiental

La UNESCO, a finales de la década de los sesenta, realizó un esfuerzo por estudiar las formas de incluir el tema ambiental como recurso educativo. Por lo cual solicitó a la Oficina Internacional de Educación (OIE) un estudio comparativo sobre la manera de abordar los temas del medio ambiente en

la escuela, que pretendía detectar cuales eran las actividades educativas que se realizaban en los países. Esta investigación mencionó en sus resultados la necesidad de abordar la temática ambiental desde una perspectiva transversal, criterio que luego sería uno de los principios de la Educación Ambiental. Sin embargo, y debido al contexto en el que se realiza el estudio, considera a la Educación Ambiental como escolarizada, es decir, diseñada y ejecutada desde las instituciones educativas (Novo, 1998).

El concepto de Educación Ambiental toma fuerza en la "Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente", Estocolmo, 1972. A partir de esta reunión se destaca su importancia en el cambio del modelo de desarrollo, asociado principalmente al ecodesarrollo. Se habla, además, de una Educación Ambiental escolarizada y no escolarizada que debe enfocar su atención en los jóvenes, adultos y medios de comunicación, actores centrales de la problemática ambiental (Salgado, 2007).

La Educación Ambiental dentro de las actividades de BIOAAE, ha generado un acercamiento directo con la sociedad, ya que el principal objetivo es sensibilizar a la sociedad de las buenas y malas acciones cotidianas que afectan a nuestro entorno, buscando espacios de dialogo en donde se comparten experiencias y vivencias que detonen la importancia del cuidado de nuestro medio ambiente, evitando satanizar las malas acciones, pues esto no quiere decir que no digamos que continúen con ellas, si no que se busca que se entienda y se reflexione que con la generación de mejores acciones en nuestras actividades cotidianas podremos acceder a un mejor futuro. Esta visión de acercamiento con la sociedad ha permitido a BIOAAE estar presente en el Estado de Guerrero desde 2016 realizando talleres, conferencias, foros y demás actividades sobre educación ambiental.

Asentamiento Nueva Esperanza

La colonia Nueva Esperanza tiene formalmente 10 años de creación y se encuentra localizada al norte de la ciudad de Chilpancingo, Gro., y es considerada un asentamiento irregular por las características que se presentan en el territorio y por la nula accesibilidad de los servicios a sus habitantes.

La proximidad a este asentamiento se dio a través de una problemática creada por la misma irregularidad, en 2019 a causa de un incendio provocado por cortos circuitos de cables e instalaciones eléctricas en mal estado, ya que estas solo son largos cables sostenidos por palos traído de otras colonias y que dan energía eléctrica a las viviendas de la nueva esperanza lo que desato a la pérdida total de una vivienda.

Por lo que como BIOAAE nos unimos a un proyecto de Bio-Construcción en conjunto con otras organizaciones como Colectivo Tlalli y la Universidad Autónoma de Guerrero con su departamento de sustentabilidad. El proyecto tendría como objetivo el realizar una vivienda en donde los residuos sólidos urbanos serían la materia prima para este proceso. Así que BIOAAE colaboró con la gestión de recursos y mano de obra. Y este fue el primer acercamiento con el asentamiento en donde visualizamos la oportunidad de intervenir y promover acciones de educación ambiental.

Desarrollo

Para poder generar acciones dentro de este asentamiento comenzamos realizando un recorrido de reconocimiento con habitantes de este mismo, identificamos los límites que corresponden el cuadrante del asentamiento, así como una breve reseña del cómo es que se formó, sus lideres, experiencias positivas y negativas de los gestores, sus diferentes transformaciones y origen de quienes hacen el asentamiento Nueva Esperanza. Con lo anterior, se pudo obtener caracterización del asentamiento (características físicas, sociales, económicas y ambientales) y con ello identificar las principales problemáticas (tabla 3.1) presentes en él.

Con base en la tabla 3.1, generamos, en conjunto a los habitantes del asentamiento, un diálogo donde, a través de los comentarios y la intervención en los ejes, se construyó una matriz de priorización (tabla 3.2), en donde las problemáticas se fueron enlistando y comentando sobre en cual se podría trabajar, se llegó al acuerdo en el que el eje de contaminación por residuos sólidos urbanos se tomaría como prioridad y que a través de este se podría ir enlazando con los demás.

Tabla 3.1. *Observaciones del recorrido por el asentamiento irregular Nueva Esperanza*

Ejes	*Observaciones*
Sistemas productivos	• No hay sistemas de producción • Árboles Frutales
Medio ambiente	• Residuos constantes • Registro de quemas • Árboles escasos • No hay áreas verdes
Salud y toxicidad	• Animales en estado de Putrefacción • Olores fétidos por residuos, descomposición y quemas. • Falta de drenaje (durante el recorrido se observaron heces fecales)
Genero	• Mayor presencia de mujeres en las tareas del hogar, así como en las actividades del asentamiento.
Territorio y bioculturalidad	• Cancha rústica • Capillas configuras religiosas • Accesos accidentados • Área de reuniones o casa de juntas (techado)

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos por el trabajo de campo.

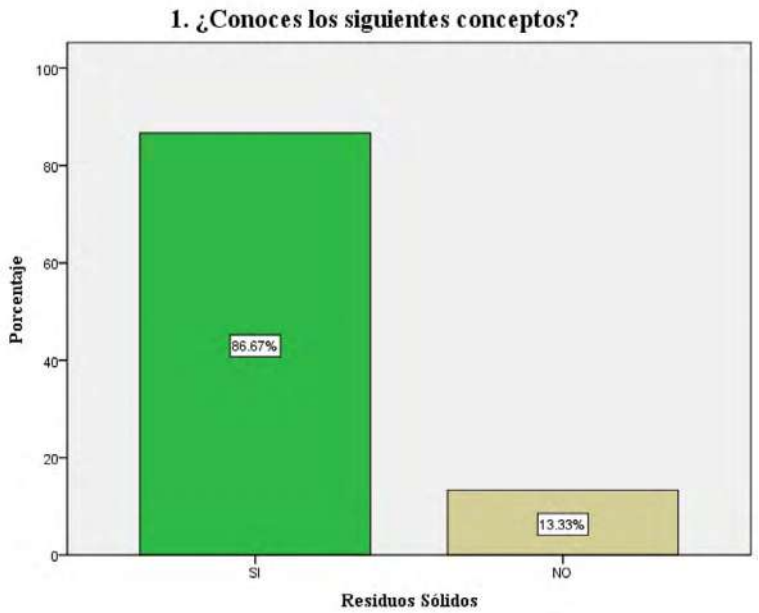
Tabla 3.2. *Matriz de priorización*

	Desigualdad de las tareas (genero)	*Áreas verdes Sistemas productivos*	*Cultura ambiental*	*Contaminación y falta de agua*	*Contaminación por residuos sólidos urbanos*
Desigualdad de las tareas (género)					
Áreas verdes Sistemas productivos	Áreas verdes Sistemas productivos	Áreas verdes Sistemas productivos			
Cultura ambiental	Cultura ambiental	Cultura ambiental	Cultura ambiental	Cultura ambiental	Cultura ambiental
Contaminación y falta de agua	Contaminación y falta de agua	Contaminación y falta de agua	Cultura ambiental		
Contaminación de residuos sólidos urbanos	Contaminación de residuos sólidos urbanos	Contaminación de residuos sólidos urbanos	Cultura ambiental		

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos por el trabajo de campo.

Una vez teniendo en cuenta que la población identifica las problemáticas del asentamiento, se realizó una encuesta basada en los residuos sólidos urbanos para tener una mayor percepción sobre su conocimiento sobre este concepto y su cotidianidad con los residuos para poder partir de ahí y generar las distintas estrategias de educación ambiental.

Figura 3.1. *Concepto de residuos sólidos*

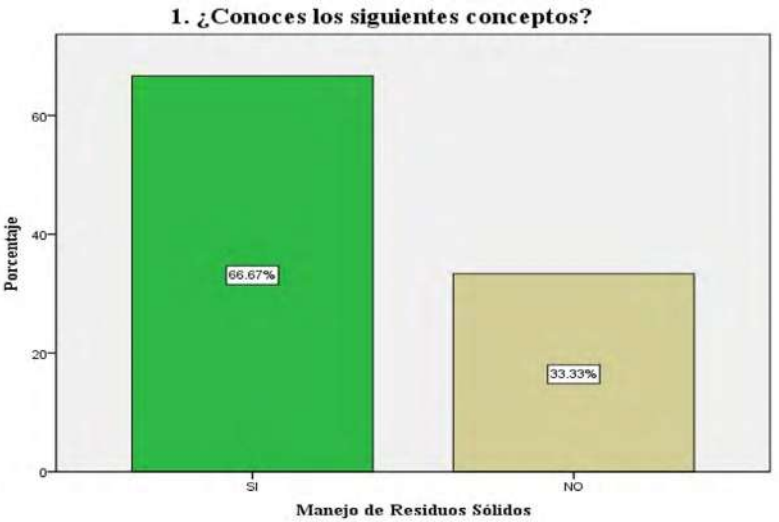


Fuente: elaboración propia.

Los resultados fueron los siguientes: para el primer concepto sobre residuos sólidos (figura 3.1), se obtuvo como respuesta que el 86.67% de los encuestados respondió que sí conoce el concepto, mientras que el 13.33% respondió no conocerlo. Para el segundo concepto, que es el manejo de residuos sólidos (figura 3.2), el 66.67% respondió sí conocer el concepto, mientras el 33.33% respondió que no lo conocía. En el tercer concepto, que es segregación de residuos sólidos (figura 3.3), el 46.67% respondió que tenía conocimiento del concepto y el 53.33% respondió no conocerlo. Para el concepto cuarto y último de la primera pregunta de la encuesta —tratamiento de residuos sólidos—, el 33.33% respondió sí conocer el concepto, mientras el 66.67% respondió que no lo conocía (figura 3.4).

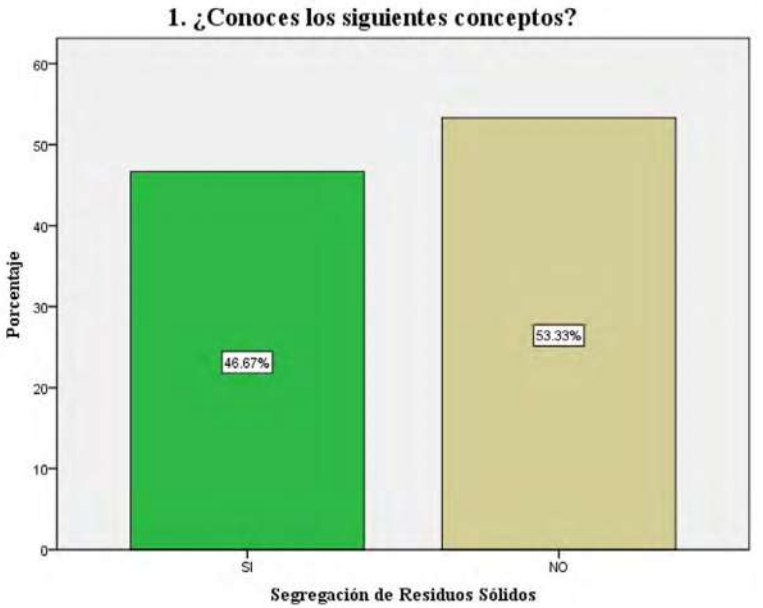
Nuestra segunda pregunta se refirió a si cuentan con el servicio de recolección de residuos sólidos urbanos. El 33.33% respondió que sí, mientras que el 60% mencionó que no existe una recolección de los residuos. Dentro de esta pregunta —en la cual las respuestas solo eran sí, no u otra y se solicitaba que se mencionara qué alternativa tenían para el destino final

Figura 3.2. *Concepto de manejo de residuos sólidos*



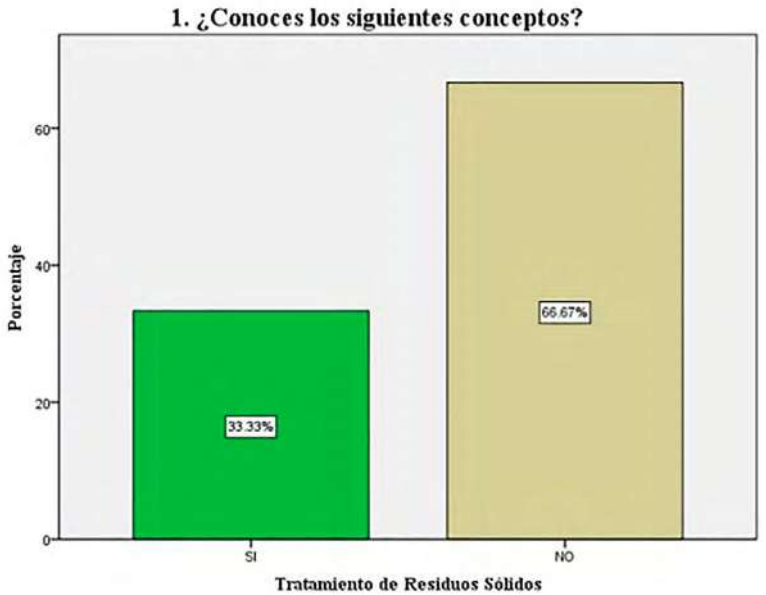
Fuente: elaboración propia.

Figura 3.3. *Concepto de segregación residuos sólidos*



Fuente: elaboración propia.

Figura 3.4. *Concepto de tratamiento de residuos sólidos*



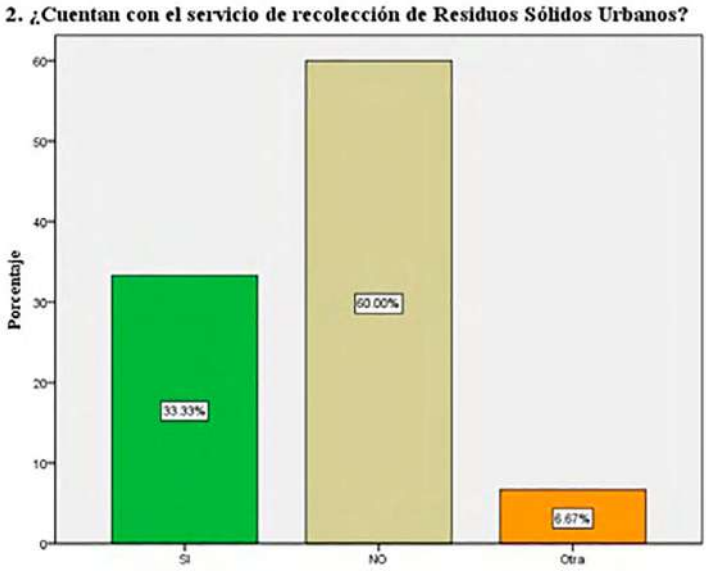
Fuente: elaboración propia.

de los desechos—, se obtuvo que el 6.67% colocó al servicio de la "basura jefa" como un servicio particular, del cual hace uso y con cobros a los usuarios en su mayoría excesivos (figura 3.5).

Los resultados de la tercera pregunta ("¿Qué problemas son generados por el mal manejo de los residuos sólidos?") fueron de la siguiente manera (figura 3.6): el mayor porcentaje lo obtuvo con el 46.67% la respuesta de contaminación, seguido de problemas de salud con un 20%, la respuesta de mal aspecto obtuvo el 6.67%, compartiendo el mismo porcentaje del 6.67% respondieron que no generan ningún daño y el 20% respondió que todos los anteriores son generados por residuos sólidos urbanos.

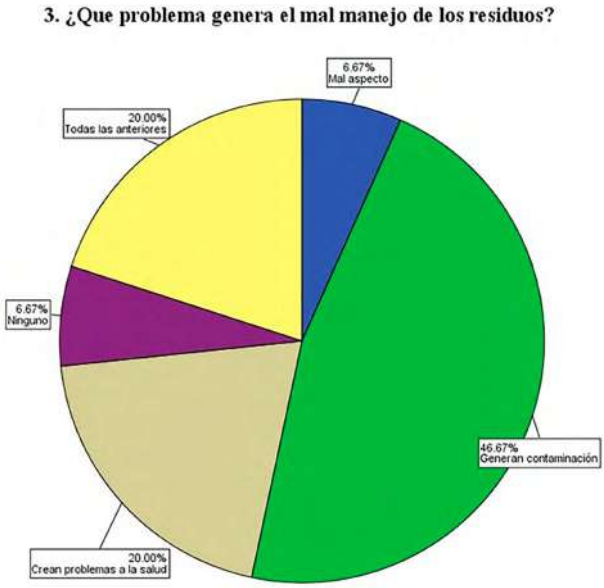
Para conocer cuáles eran los residuos que con mayor frecuencia se generan en las viviendas de este asentamiento se generó la pregunta 4 que corresponde a "¿Cuál es el residuo que más se genera en tu domicilio?". Para lo cual obtuvimos los siguientes resultados (figura 3.7) los encuestados respondieron que plásticos con el 53.33%, papel y cartón con el 26.67% mientras que el 6.67% su desecho de mayor generación son las latas de

Figura 3.5. *¿Cuentan con el servicio de recolección de residuos sólidos urbanos?*



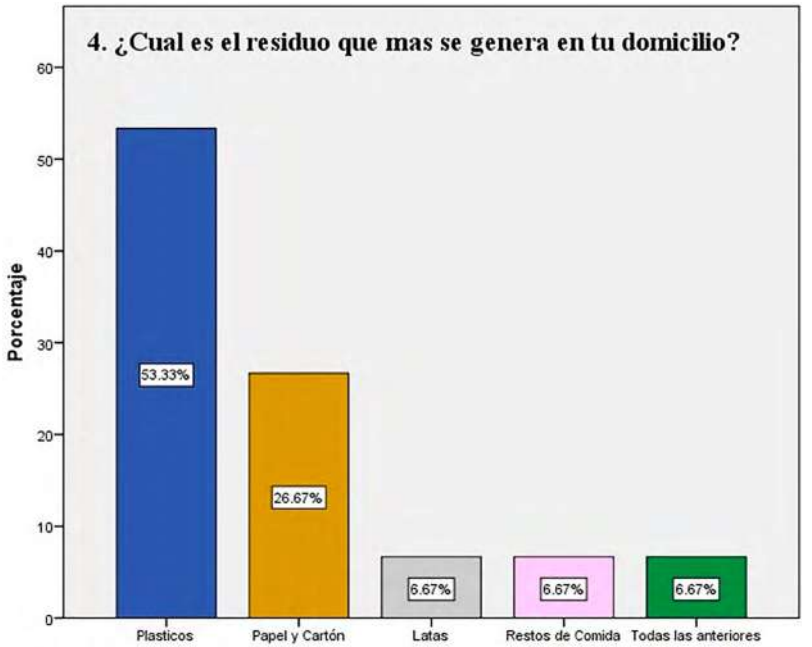
Fuente: elaboración propia.

Figura 3.6. *¿Qué problema genera el mal manejo de los residuos?*



Fuente: elaboración propia.

Figura 3.7. *¿Cuál es el residuo que más se genera en su domicilio?*



Fuente: elaboración propia.

aluminio, también hubo quienes sus desechos con más frecuencia son los restos de comida, con un 6.67% y algunas personas respondieron que todos los anteriores son residuos que generan en su domicilio con un 6.67%.

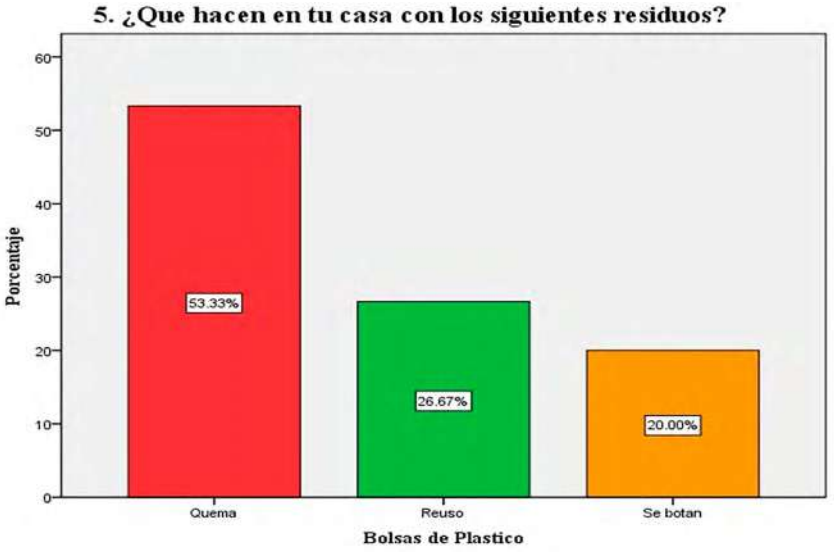
Nuestra penúltima pregunta de la encuesta se basó en cómo se deshacen de sus residuos o qué es lo que hacen con ellos, poniendo como referencia los envases de PET, bolsas de plástico, vidrio, papel y cartón, residuos de comida y latas de aluminio, y para ello se desglosan los resultados de la siguiente manera.

Para el caso de los envases de PET, el 46.67% los quema, el 33.33% los bota, el 13.33% reúsa estos envases y solo el 6.67% los vende (figura 3.8). Los residuos de bolsas de plásticos suelen ser quemados por el 53.33% de los encuestados, el 26.67% practica el reúso de estas bolsas plásticas, mientras que el 20% las bota (figura 3.9). El vidrio obtuvo que el 66.67% lo bota, el 20% lo reúsa y el 13.33% lleva a cabo la venta de este material (figura 3.10), mientras que con los residuos de papel y cartón, las personas

Figura 3.8. *¿Qué hacen en su casa con los envases de plástico?*

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.9. *¿Qué hacen en su casa con las bolsas de plástico?*

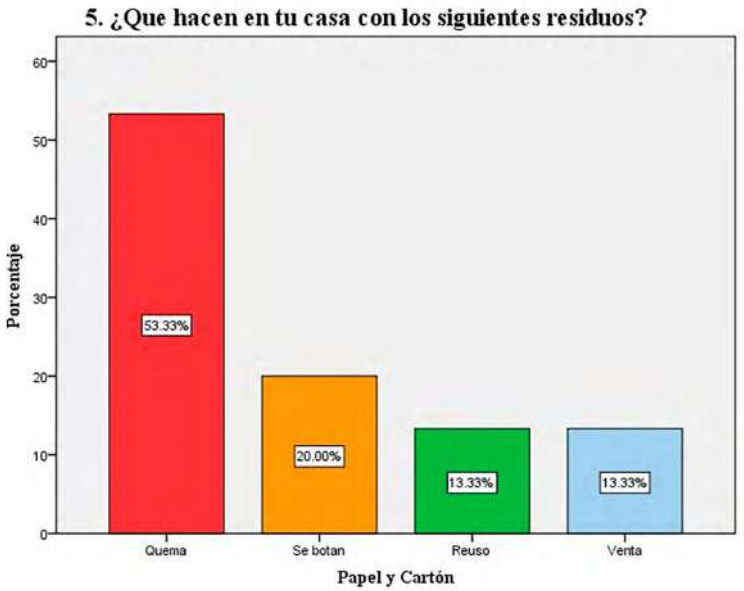


Fuente: elaboración propia.

Figura 3.10. *¿Qué hacen en su casa con el vidrio?*

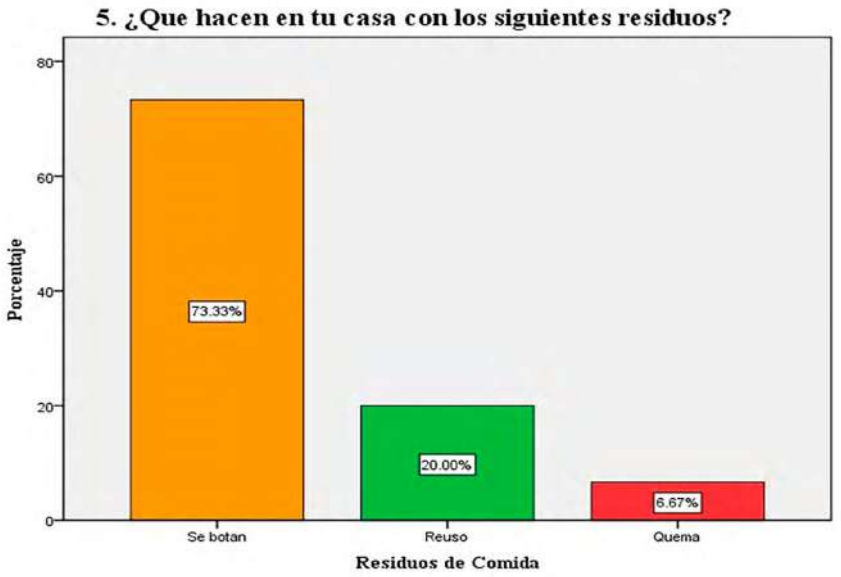
Fuente: elaboración propia.

Figura 3.11. *¿Qué hacen en su casa con el papel y el cartón?*



Fuente: elaboración propia.

Figura 3.12. *¿Qué hacen en su casa con los residuos de comida?*



Fuente: elaboración propia.

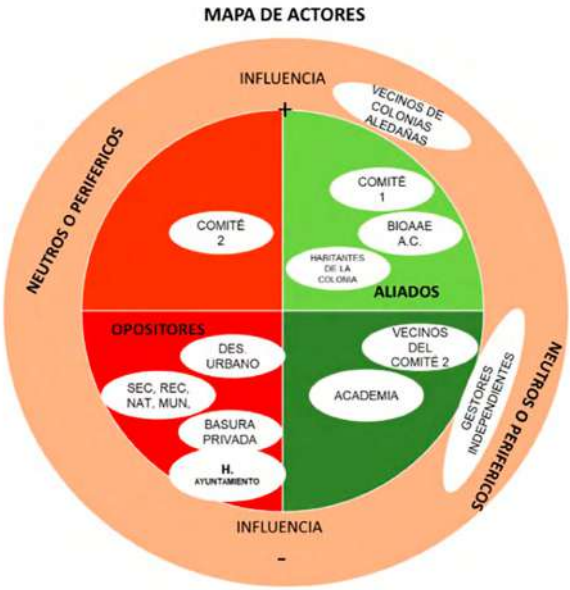
encuestadas respondieron de la siguiente manera: el 53.33% los quema, el 20% los bota solamente, el 13.33% realiza la acción del reúso y el 13.33% ve la oportunidad de venderlos (figura 3.11). Por último, para el caso de los residuos de comida (figura 3.12), cerca de tres cuartas partes de la población bota los desechos, mientras que un 20% los reúsa de diversas maneras y un 6.67 % los quema al aire libre.

Nuestra sexta y última pregunta hacía referencia a que si tenían el interés de participar en un plan de mejoramiento para su asentamiento a través de los residuos sólidos urbanos, por lo que la respuesta fue positiva por parte de todos los encuestados.

Una vez realizado el diagnóstico y la encuesta se formularon acciones de educación ambiental en donde la aplicación de la economía circular sea la base de las acciones que permitan crear un modelo manejo de los residuos a través de la gestión popular.

De acuerdo con la parte del trabajo bajo una gestión popular es necesario identificar quiénes están dentro del territorio, para ello se llevó a cabo un mapeo colectivo *(*véase figura 3.13) en el que habitantes del asen-

Figura 3.13. *Mapeo de actores del asentamiento irregular Nueva Esperanza*



Fuente: elaboración propia.

tamiento discutieron quiénes son la parte fundamental para el desarrollo de su espacio y, con ello, sentar las bases para próximas acciones.

Como parte de las actividades planeadas, se realizaron charlas con el objetivo de fortalecer los conceptos y términos presentados en la encuesta, así como del cuidado del medio ambiente, mostrando alternativas que pueden desarrollar haciendo uso de la economía circular, este mismo concepto se explicó de manera detallada para que se comprendiera que, si bien es un término nuevo y que comienza a utilizarse de gran manera, hay acciones que se han venido haciendo de forma cotidiana y que forman parte del concepto, resaltando que solo es necesario fortalecer las acciones para tener un mayor alcance y resultado.

Dentro de las actividades de educación ambiental se realizó una limpieza por el asentamiento recorriendo zonas en donde se habían identificado como puntos rojos (zonas de mayor afluencia de residuos), así como de las principales calles. Por iniciativa de los habitantes proporcionaron un espacio en el cual se depositaron los residuos, este sitio funcionaría como

centro de almacenamiento y de acopio de los residuos para su clasificación y darle el final adecuado.

Se dieron talleres sobre realización de compostaje a través de residuos de frutas, verduras, entre otros que ellos mismos producen, con el objetivo de promover esta circularidad entre lo que consumen y desechan, dando pie a que pueden no solo producir una composta si no que pueden generar espacios de cultivo traspatio de manera orgánica que les permitan obtener algunos alimentos utilizando la composta como sustrato y nutriente. De esta misma forma siempre se les impulso a que le den un valor a su producción y pueden gestar un espacio comunitario de producción de composta y promover la venta de este producto.

Como parte de las acciones de educación ambiental, se implementaron otros ejercicios donde pudiera hacer practica de la reutilización de los residuos que permitieran primero a ellos, como habitantes del asentamiento y dueños de sus residuos, el implementar ecotecnologías y una de ellas fue el poder conocer cómo a través de los residuos se logran realizar captadores de agua de lluvia los cuales aprovecharían, ya que una de sus características por ser irregulares es el abastecimiento de este recurso hídrico, y con la intención de en temporal de lluvias puedan almacenar y utilizar el recurso de manera eficaz y disminuir el gasto que producen al consumo de agua en pipa que también es de difícil acceso.

Conclusiones

Las acciones que se generan para impulsar el cuidado del medio ambiente a través de la educación ambiental, y con ella impulsar la economía circular son pocas y se visualizan menos ya que siempre se trabaja desde arriba, desde una acción gubernamental o sector privado, dejando de lado los sectores que reciben todas las consecuencias de la contaminación.

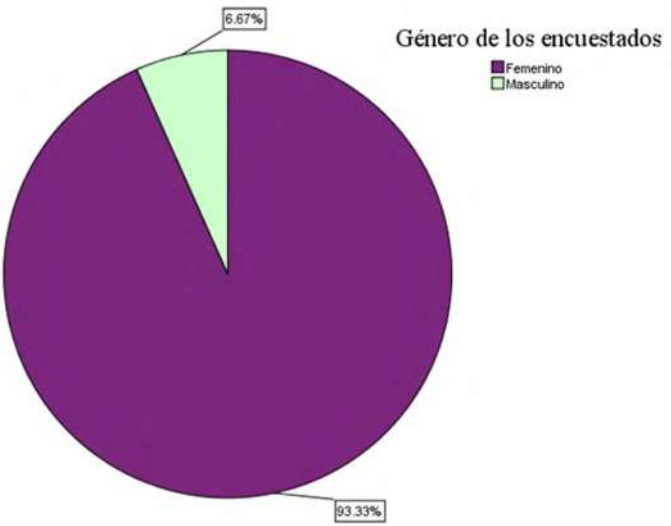
Si bien, algunas de las dependencias gubernamentales tienen sus áreas de Educación Ambiental y tienen por obligación el implementar estrategias, programas o acciones que den paso al cumplimiento de los acuerdos nacionales e internacionales, parece ser que no se está haciendo, "se hace como que se hace", "se simulan acciones" y no hay avances en materia

ambiental por meros intereses que no son los de la sociedad realmente afectada.

Por lo anterior es que proponemos y promovemos el impulso en la adopción de una Gestión Popular de los residuos sólidos urbanos, ya que esta permitirá tener una visión más enfocada a las problemáticas reales que estos están provocando y se podrá impulsar a mayor escala la economía circular que, si bien sabemos que se ha venido trabajando desde antes, necesitamos reforzar y dar las herramientas necesarias para una mejor implementación. Para ello, podemos tomar las bases de la educación popular que nos da técnicas en donde su principal objetivo es la participación de todas y todos, a la vez que aportan también sus saberes y experiencias, dejando de lado la verticalidad para poder desarrollar y fortalecer la capacidad de reflexión, análisis y debate y fortalecer los procesos colectivos frente a una realidad que empuja al individualismo (Vargas, 1992).

Cabe mencionar el reconocimiento en esta investigación de que quienes llevan una mayor interacción con los residuos sólidos urbanos son las jefas de familia (figura 3.14), y en nuestra experiencia dentro del asentamiento no fue la excepción, ya que ellas son las actoras principales de su

Figura 3.14. *Género de personas encuestadas*



Fuente: elaboración propia.

territorio desde la parte de las gestiones de mejoras ante instancias gubernamentales y del trabajo comunitario dentro de su asentamiento.

Es importante retomar la parte del trabajo comunitario, ya que esto permitirá, no solo el bienestar ambiental, sino que fortalece la comunalidad esto lo vemos reflejado en el trabajo de Rojas titulado "Experiencia de participación comunitaria para el manejo adecuado de residuos sólidos urbanos en México", donde participaron 23 niños/niñas y 14 mujeres de manera directa en actividades de la intervención. Se incrementó 4.74% el conocimiento sobre manejo de los residuos, 4.5% la susceptibilidad percibida y 3.39% los beneficios percibidos. La basura se percibe como problema asociado a daños a la salud y medio ambiente. Se identificó a la mujer responsable como del manejo de residuos sólidos. Se favoreció la relación vecinal e incorporación de acciones de separar residuos y barrer las calles con más frecuencia (Rojas, 2015). De esta manera creemos que se reflejaran mayores resultados, conjuntando la Educación Ambiental y la Gestión Popular para fortalecer la economía circular en México.

Referencias

Connolly, P. (2012). La urbanización irregular y el orden urbano en la zona metropolitana del Valle de México de 1990 a 2005. En C. E. Salazar (Ed.), *Irregular: Suelo y mercado en América Latina* (pp. 379-425). El Colegio de México. https://www.jstor.org/stable/j. ctt14jxpwm.14

López-Ojeda, M.C. (2023). *Sistemas socioecológicos, asentamientos irregulares por migración y disponibilidad de agua en la colonia Nueva Esperanza, Chilpancingo, Gro.* [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Autónoma de Guerrero.

Nahoum, B. (2011). Los asentamientos irregulares, entre prevenir y curar. En *Escritos sobre los sin tierra urbanos: Causas, propuestas y luchas populares* (pp. 13-23). Trilce.

Novo, M. (1998). *Educación ambiental: Base éticas, conceptuales y metodológicas.*

ONU-Hábitat. (2005). *Tenencia de la tierra, derechos a la vivienda y género. Marco Nacional y Urbano: México* (serie de Análisis sobre la Ley, la Tenencia de la Tierra y el Género en América Latina). Programa de Asentamientos Humanos de Naciones Unidas.

Parlamento Europeo. (2021). *Economía circular: definición, importancia y beneficios.* https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios

Rojas Carmona, A., Rodríguez Bolaños, R., Álamo Hernández, U., Pacheco Magaña, L. E., Treviño Siller, S. y Márquez Serrano, M. (2015). Experiencia de participación

comunitaria para el manejo adecuado de residuos sólidos urbanos en México. *Global Health Promotion*, *22*(2), 96-106.

Salgado, B. M. C. (2007). Educación ambiental y educación para el desarrollo sostenible en América Latina. *Revista de la Cátedra UNESCO sobre Desarrollo Sostenible*, *1*(1), 29-37.

Torres, R. M. (1986). *Educación popular, un encuentro con Paulo Freire*. Cuenca.

Varela, A. (2025). Asentamientos humanos invisibilizados: Un estudio de la conceptualización y medición de los asentamientos irregulares en México desde tres cifras clave. *Esfera Pública: Revista en Gobernanza y Sociedad, 3*(5), 146-180. https://www.esferapublica.mx

Vargas V., L. y Bustillos, G. (1992). Técnicas participativas para la educación popular. En *Técnica participativas para la educación popular* (pp. 920-920).

4. Modelo de emprendimiento de proyectos productivos basado en la economía circular y solidaria

Juan José Bedolla Solano[1]
Irma Bedolla Solano[2]
Adriana Miranda Esteban[3]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.04

Resumen

Los modelos de emprendimiento basados en la economía circular y solidaria buscan gestionar actividades económicas y proyectos productivos en comunidades rurales y semiurbanas. En Guerrero, las limitaciones socioeconómicas afectan a emprendedores, debido a falta de recursos, capacitación y financiamientos para desarrollar y promover proyectos productivos. Además, la escasez de tecnologías e infraestructura obstaculizan el desarrollo de iniciativas sostenibles, restringiendo el crecimiento económico. El objetivo del presente estudio documental/descriptivo fue analizar el emprendimiento en comunidades rurales y semiurbanas, explorando la percepción de la sociedad emprendedora en actividades o proyectos productivos alineados con la economía circular y solidaria. Se diseñó y aplicó una entrevista para analizar ocho actividades económicas, clasificadas en primarias: agricultura, ganadería y pesca; secundarias: productos procesados y artesanías; y terciarias: comercio, turismo y servicios. Los resultados muestran que, en comunidades rurales y semiurbanas de Guerrero, predominan actividades económicas y proyectos productivos enfocados en el comercio, productos procesados y agricultura; sin embargo, el conocimiento sobre

[1] Doctor en Desarrollo Regional por el Instituto Tecnológico de Acapulco, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6999-8823
[2] Doctora en Ciencias de la Educación. Profesora del Tecnológico Nacional de México, Campus Acapulco, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9499-8397
[3] Doctora en Ciencias Ambientales. Docente en la Universidad Autónoma de Guerrero, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4313-6146

economía circular es limitado, y no se fomentan prácticas como reutilización, reciclaje, rediseño, u otras acciones de educación ambiental que favorezcan la promoción de la sostenibilidad. El emprendimiento basado en la economía circular se percibe como una oportunidad para las actividades de artesanías, comercio y productos procesados para el crecimiento económico y el mejor aprovechamiento de recursos y materias primas de la región. Gestionar la economía circular y solidaria mediante modelos de emprendimiento innovadores, impulsan el desarrollo regional y económico, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y las metas de la agenda 2030.

Palabras clave: *actividades económicas, comunidades rurales y semiurbanas, economía circular, modelo de emprendimiento.*

Introducción

El sistema económico productivo representa las actividades socioeconómicas integradas a los sistemas de producción, cadenas productivas y mercados de las comunidades; donde se evalúan las diversas actividades económicas que se desarrollan en la región (Andrade et al., 2023). El sistema económico centrado en el crecimiento continuo del nivel de producción y consumo, conduce al agotamiento de los recursos; siendo la economía circular, la estrategia para la reducción tanto de la entrada de materiales vírgenes como de la salida de desechos de la cadena de producción. En este sentido, la creación de un sistema de emprendimiento basado en la economía circular sustituye el modelo de ciclos rápidos de "producir", "consumir" y "tirar". De acuerdo con la teoría del desarrollo sostenible, se debe crear un mayor valor agregado para la sociedad, reducir el impacto negativo sobre el medio ambiente y satisfacer los intereses de todas las partes interesadas en sus actividades (Rangel Saltos et al., 2022).

El estado de Guerrero, considerado como una de las entidades con mayor rezago económico, presenta diversas problemáticas y limitaciones de recursos en los diferentes sectores de la sociedad. Entre las carencias sociales de la población se mencionan el rezago educativo, servicios de sa-

lud, seguridad social, calidad y espacios de la vivienda, servicios básicos en la vivienda, alimentación nutritiva y de calidad, entre otras limitaciones de indicadores que presencian la pobreza extrema (Coneval, 2022). La gestión de modelos con estrategias de innovación social con agro-cultura y economía circular solidaria que promueva prácticas productivas y la generación de ingresos atenderá las distintas carencias y problemas territoriales y espaciales (Ortega Anguiano, 2023).

El diseño de un modelo de economía circular se somete a nuevos modelos de producción que propenden a concebir respuestas y resultados a la minimización del cambio climático y en búsqueda del progreso a niveles sostenibles, donde interviene el Estado y la sociedad como ejes fundamentales para alinear proyectos, procesos de producción y consumo; buscando contrarrestar perjuicios hacia el medio ambiente (Rosero Figueroa et al., 2024). Un modelo fundamentado en los postulados de la economía circular examinando las tecnologías aplicables al sector agropecuario puede ser replicable en unidades productivas clasificadas como pequeños productores (Rodríguez, 2023).

Los proyectos productivos persiguen satisfacer necesidades modificando el entorno, mejorando condiciones de vida, el trabajo y la cotidianidad de una población o de grupos más desprotegidos buscando generar ingresos. En el medio rural contribuyen al desarrollo local mediante la atención de diversas problemáticas abordando el desarrollo rural con una visión de la teoría económica y de las libertades o capacidades humanas (Damián Simón, 2022). Las estrategias de innovación social aplicables a la economía circular contribuyen a la potenciación del ámbito económico y la transformación de una población avanzada y solidaria (Rodríguez Brito et al., 2023).

La crisis ambiental ha ganado espacio en la agenda internacional, cuyos debates están claramente identificados en la Agenda 2030 y que se propone superar a partir de los Objetivos del Desarrollo Sustentable (ODS); por otro lado, no se puede dejar de lado que una externalidad como la tecnología ha marcado diferencias en la forma de hacer las cosas y de comunicarse, vivimos en la economía de la información, con las tecnologías de la información y comunicación (TIC) y la economía digital que hoy también son parte de la economía circular; la cual exige cambios graduales; pero

también, transformaciones radicales orientando a la reducción de los impactos del medio ambiente y de la obtención y generación de recursos que faciliten la transición, lo que llevará también a cambios culturales en las personas (Carrillo González y Pomar Fernández, 2021).

La economía circular como una manera concreta de integrar la sostenibilidad ambiental y social al desarrollo económico, implica no solo mejorar y sostener la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos, sino también brindar beneficios económicos a través de la extensión de la vida de los productos durante la mayor cantidad de tiempo posible (Mastellone, 2022). La economía circular se define como un proceso generativo y de restauración que incrementa el valor de los materiales al insertarlos en nuevos procesos productivos (Guerrero-Villegas y Wilma, 2024). La economía circular se presenta como una opción válida al momento de fomentar el desarrollo social y agroindustrial en aquellas regiones que exhiben características propensas para potenciar una dinámica socioproductiva con ese modelo; que contribuye al desarrollo sustentable y sostenible; donde existe la posibilidad de reutilizar, renovar o reciclar productos, prolongando la vida útil y aminorando la velocidad en la que se generan residuos contaminantes (Salgado-Tello et al., 2024).

El emprendimiento comunitario para distintas comunidades es considerado fundamental para el desarrollo de las poblaciones, donde muchas micro, pequeñas y medianas empresas y proyectos agroturísticos, contribuyen a la economía local y la cohesión social (Llaque Lino, 2024). Por otro lado, la tecnología digital y su influencia en el emprendimiento se ha convertido en una herramienta fundamental que fomenta una gran oportunidad para enfrentar los desafíos del mundo empresarial actual donde se explora la innovación, el crecimiento económico y la prosperidad de la sociedad (Lozano Montero y López Salazar, 2023). El emprendimiento basado en la economía circular y estructurado, a través de un modelo de gestión de proyectos productivos, contribuye al cuidado ambiental y posibilita la sostenibilidad.

El estudio se orientó en torno a los siguientes propósitos: (a) explorar y describir las actividades económicas de emprendimiento y con oportunidades circulares identificadas y llevadas a cabo en las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero; (b) analizar la percepción de la sociedad emprendedora, respecto al emprendimiento basado en la economía

circular y solidaria como una alternativa de aprovechamiento de los recursos y materiales de la región; (c) presentar aspectos y/o elementos para el diseño de un modelo de emprendimiento y de gestión de proyectos productivos basado en la economía circular y solidaria para las actividades identificadas; mismas que se clasificaron en primarias: agricultura, ganadería y pesca; secundarias: productos procesados y artesanías; y terciarias: comercio, turismo y servicios; con el objeto de promover mejores prácticas de reutilización, reciclaje y rediseño, buscando impulsar la sostenibilidad para las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero.

Metodología

Tipo de estudio

La metodología empleada para el estudio fue la investigación exploratoria, cualitativa y documental, enmarcando a la sociedad emprendedora; centrada en conocer las prácticas desarrolladas en actividades económicas a partir de la descripción e interpretación de las opiniones. El objeto de estudio fue analizar actividades económicas basadas en la economía circular y solidaria, identificadas en la gestión de proyectos productivos desarrollados por la comunidad rural y semiurbana para conocer la percepción de la sociedad emprendedora; al mismo tiempo, identificar aspectos y elementos para promover el diseño de un modelo de emprendimiento.

El enfoque de la investigación es de tipo cualitativo y de corte descriptivo, se realizó un análisis sistematizado de argumentos organizando la información obtenida por parte de los emprendedores en tablas descriptivas, señalando definiciones, la postura de la economía circular aplicada en la región y características de los aspectos valorados. La investigación con técnica descriptiva tiene como propósito conocer el problema y su entorno para tener un acercamiento al tema, buscando esclarecer términos y significados, así como también conocer posturas de análisis para su contraste (Gómez-García, 2024). El método de recolección de información contempló la observación y entrevista, realizada por asociación durante el trabajo de campo en las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero.

Instrumentos

Los instrumentos diseñados y aplicados para la recolección de datos fueron la entrevista y observación, las cuales se realizaron a la sociedad emprendedora de las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero. La investigación documental presente regularmente en todos los estudios debido a que se realiza análisis investigativo y estudios del arte, el investigador se apoya de la sistematización y el análisis de datos para conocer el fenómeno (Bedolla et al., 2023). Para el análisis documental y sistematizado se utilizaron diseños de tablas y cuadros descriptivos para catalogar aspectos y elementos para su articulación en un modelo basado en la economía circular y solidaria.

El instrumento de entrevista diseñado para la recolección de datos fue aplicado a grupos focales de emprendedores de las ocho actividades que fueron identificadas y clasificadas en primarias: agricultura, ganadería y pesca; secundarias: productos procesados y artesanías; y terciarias: comercio, turismo y servicios. La entrevista, como una herramienta de valoración de la realidad de un sujeto, permite desprender y describir interpretaciones por parte del investigador (Aguilar, 2024). Y en este sentido, se enmarcaron las técnicas de investigación en campo para registrar e interpretar procesos significativos del emprendimiento local.

Procedimiento

En la figura 4.1 se presenta el esquema metodológico que hace referencia al proceso de desarrollo del estudio, en donde se describen de manera secuencial las fases o etapas de los procedimientos y/o actividades; mismas que se estructuraron en (1) Exploración de actividades económicas y oportunidades circulares en las comunidades rurales y semiurbanas, (2) Percepción de la economía circular y solidaria por la sociedad emprendedora y (3) Diseño de modelo de emprendimiento basado en la economía circular y solidaria.

Figura 4.1. *Esquema metodológico del estudio: "Modelo de emprendimiento de proyectos productivos basado en la economía circular y solidaria"*

Primera Fase Exploración de actividades económicas y oportunidades circulares en las comunidades rurales y semiurbanas	*Revisión documental de actividades económicas y de gestión de emprendimiento con oportunidades circulares en comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Gro.* • Trabajo de campo y exploración de actividades económicas Diseño de cuadros y tablas descriptivas argumentando la integración de la economía circular en actividades y proyectos productivos Identificación de la economía circular y la aplicación de la reutilización, el reciclaje y el rediseño
Segunda Fase Percepción de la economía circular y solidaria por la sociedad emprendedora	*Percepción de la comunidad emprendedora y alternativas para el aprovechamiento de los recursos naturales y materiales de la región* Diseño y aplicación de entrevistas a la comunidad emprendedora • Diseño de tablas descriptivas con argumentos sistematizados a partir de la sociedad emprendedora Promoción del emprendimiento con alternativas basadas en la economía circular y solidaria; buscando impulsar el aprovechamiento de los recursos naturales
Tercera Fase Diseño de modelo de emprendimiento basado en la economía circular y solidaria	*Diseño de un modelo de emprendimiento y gestión de proyectos productivos basado en la economía circular y solidaria* • Análisis y clasificación de actividades económicas Promover las mejores prácticas de reutilización, reciclaje y rediseño Fomento de la sostenibilidad para las comunidades rurales y semiurbanas Estructura de un modelo de emprendimiento basado en la economía circular

Fuente: elaboración propia.

Primera fase. Exploración de actividades económicas y oportunidades circulares en las comunidades rurales y semiurbanas

En esta primera fase del estudio se llevó a cabo una investigación documental y de revisión sistematizada, donde se argumentaron los procesos de emprendimiento implementados durante la gestión de proyectos productivos con enfoque de campo; explorando las actividades económicas de emprendimiento desarrolladas con oportunidades circulares. El propósito de esta primera fase fue identificar la integración de la economía circular, explorando su aplicación para la reutilización, el reciclaje y el rediseño en las actividades económicas y proyectos productivos que se desarrollan por la comunidad emprendedora de las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero.

Segunda fase. Percepción de la economía circular y solidaria por la sociedad emprendedora

En la segunda fase se diseñó y aplicó una entrevista a la sociedad emprendedora para conocer la percepción, respecto al emprendimiento, desarrollo de proyectos y actividades, basado en la economía circular y solidaria. En esta fase del proyecto se realizaron tablas y cuadros descriptivos para documentar con argumentos sistematizados, la información percibida por los emprendedores; de esta manera poder informar y presentar alternativas que promuevan el aprovechamiento de los recursos naturales y materiales de la región que se utilizan como insumos durante el desarrollo de actividades económicas.

Tercera fase. Diseño de modelo de emprendimiento basado en la economía circular y solidaria

En la tercera y última fase del estudio se identificaron aspectos y elementos clave para el diseño de un modelo de emprendimiento y gestión de proyectos productivos basado en la economía circular y solidaria. Se analizaron y clasificaron las actividades económicas en primarias: agricultura, ganadería y pesca; secundarias: productos procesados y artesanías; y terciarias: comercio, turismo y servicios. El objetivo de esta fase fue estructurar un modelo de emprendimiento con el propósito de promover las mejores prácticas de reutilización, reciclaje y rediseño, fomentando la sostenibilidad para las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero.

Resultados

En las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero, la economía circular, se percibe como una oportunidad para las actividades económicas y los proyectos productivos que se desarrollan por los emprendedores. El emprendimiento de estas actividades sigue un enfoque de manera lineal, visionando la producción y el interés económico de los bienes y ser-

vicios. De las ocho actividades económicas clasificadas en primarias: agricultura, ganadería y pesca; secundarias: productos procesados y artesanías; y terciarias: comercio, turismo y servicios; no se visualiza la integración de la economía circular en función de las "3R" (rediseño, el reciclaje y la reutilización); la visión se centra con mayor interés en la gestión de la economía. La actividad del comercio representó una mayor aplicación e interés (25.22%), seguida de la actividad productos procesados con un 19.03%, en tercera posición la agricultura, con un 15.49%, y continuando con la artesanía (10.62%), pesca (8.41%), ganadería (7.96%), turismo (7.08%), y en la última y octava posición, servicios con un 6.19%. La identificación y clasificación de las actividades, siguiendo el enfoque lineal y económico se realizó en el estudio de gestión tecnológica y emprendimiento de proyectos socioeconómicos como estrategia de bienestar y sostenibilidad en comunidades rurales y semiurbanas de Guerrero, México (tabla 4.1) (Bedolla et al., 2024a).

Tabla 4.1. *Información técnica y estadística de actividades económicas identificadas y clasificadas siguiendo un enfoque lineal de interés económico por los emprendedores de las comunidades rurales y semiurbanas de Guerrero*

Información general y perfiles profesional/laboral				***Frecuencia***	***Porcentaje***
Género	Hombres			138	61.06%
	Mujeres			88	38.94%
Perfil académico	Primaria			38	16.82%
	Secundaria			57	25.22%
	Preparatoria			86	38.05%
	Licenciatura			45	19.91%
Actividades económicas	Agricultura			35	15.49%
	Ganadería			18	7.96%
	Pesca			19	8.41%
	Productos procesados			43	19.03%
	Artesanías			24	10.62%
	Comercio			57	25.22%
	Turismo			16	7.08%
	Servicios			14	6.19%
	Rango de edades	***Frecuencia***	***Porcentaje***	***Media***	***D.E.***
Edad	De 15 a 20 años	35	15.49%	32.52	13.4
	De 21 a 30 años	45	19.91%		
	De 31 a 40 años	60	26.55%		
	De 41 a 50 años	49	21.68%		
	De 51 y más años	37	16.37%		
Total de encuestados 226 emprendedores y personas con intención de emprender					

Fuente: Bedolla et al. (2024a).

En la tabla 4.2 se fundamenta la economía circular con posibilidades a promover en las actividades y proyectos productivos, donde se puede aplicar el rediseño, el reciclaje y la reutilización, argumentando una amplia repercusión en la producción de bienes y el aprovechamiento optimo y sostenible de los recursos naturales durante el proceso de emprendimiento y hasta la reutilización o disposición final de los subproductos. Las actividades económicas con mayores oportunidades de aplicar la economía circular son la artesanía, comercio y productos procesados; y en las que se tendrían que integrar de manera prioritaria la reutilización, el reciclaje y el rediseño, para impulsar la sostenibilidad local de las comunidades.

Tabla 4.2. *Actividades económicas de emprendimiento con mayores oportunidades circulares identificadas y llevadas a cabo en las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero*

Actividad económica	***Argumento de producción de bienes y sostenibilidad de los recursos***	***Reutilización***	***Reciclaje***	***Rediseño***
Artesanía	Elaboración de productos con materiales locales como textiles, calzado, prendas de vestir alfarería, joyería, cerámica, block, teja de barro	Sí	Sí	Sí
Comercio	Compra y venta de productos, bienes directamente al consumidor final minoritario y mayorista para satisfacer necesidades y deseos de los consumidores	Sí	Sí	Sí
Productos procesados	Transformación de materias primas en productos químicos, textiles y electrónicos. Se identifican bebidas, granos, materias primas de vegetales, frutos, especias, leche y derivados, productos químicos y residuos	Sí	Sí	Sí

Fuente: elaboración propia.

El emprendimiento basado en la economía circular y solidaria es mínimo, la comunidad emprendedora de las comunidades y colonias semiurbanas de Acapulco, Gro., perciben a este proceso como una actividad de generación de ingresos económicos y de mejora para sus familias; se aprecia el desconocimiento respeto al tema de economía circular integrada en la gestión de sus proyectos productivos; no obstante, sí tienen presente que los recursos naturales de la región se han ido disminuyendo o agotando como el recurso hídrico (agua), los bosques, el caso de la producción agrícola, ganadería y la pesca; que cada vez más se requiere de fertilizantes, tratamientos de reproducción del ganado, incubaciones de

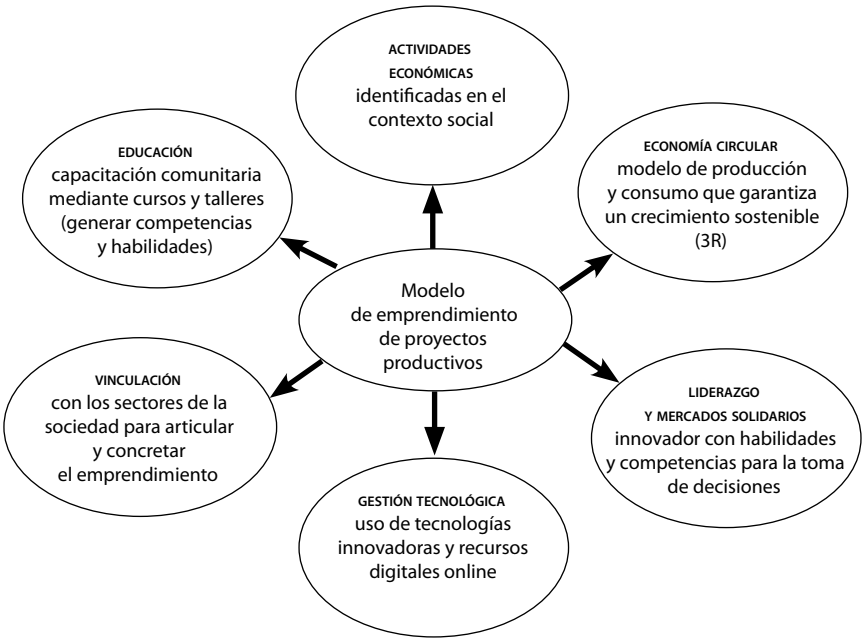
diversas especies y productos alimenticios, cultivos acuícolas artificiales, semillas tratadas y mejoradas, entre otros para generar la producción; durante el desarrollo de las actividades económicas y proyectos productivos, los emprendedores llevan a cabo los procesos pero no consideran una estrategia para la conservación de los recursos naturales o alguna prácticas que considere la reutilización, el reciclaje o el rediseño. La visión es puramente económica y con el objetivo de incrementar la producción aplicando prácticas para disminuir esfuerzo, tiempo y facilitar las tareas en los procedimientos.

El análisis documental, realizado respecto a la percepción de la sociedad emprendedora relacionado con las actividades económicas desarrolladas y la incursión de la economía circular en los proyectos productivos que se llevan a cabo en las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero; se describe una propuesta de modelo de emprendimiento, dimensionando la economía de la región en función de las "3R" (reutilización, reciclaje y rediseño). En la propuesta de modelo de emprendimiento, se especifican seis aspectos estratégicos a considerar durante el desarrollo del proceso de emprendimiento de las actividades y proyectos productivos: (1) Actividades económicas, (2) Economía circular, (3) Liderazgo y mercados solidarios, (4) Gestión tecnológica, (5) Vinculación y (6) Educación (figura 4.2).

En la tabla 4.3 se describen los elementos considerados en la gestión del emprendimiento basado en la economía circular y solidaria; se argumentan de forma sistematizada los seis aspectos fundamentales propuestos para el diseño del modelo, mismos que señalan una interrelación durante el desarrollo de los proyectos productivos con las actividades económicas basadas en la economía circular y solidaria buscando impulsar la sostenibilidad.

El modelo económico basado en la economía circular y solidaria potencia el emprendimiento local de las comunidades, con un enfoque de innovación tecnológica competitiva con oportunidades de beneficio social, de crecimiento económico y estrategia de desarrollo sustentable. El modelo de emprendimiento busca atender la huella ecológica y las metas establecidas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados en la Agenda 2030.

Figura 4.2. *Propuesta de modelo de emprendimiento de proyectos productivos basado en la economía circular y solidaria*



Fuente: elaboración propia, con base en el análisis documental y de revisión sistematizada.

Tabla 4.3. *Aspectos y/o elementos del diseño de un modelo de emprendimiento y de gestión de proyectos productivos basado en la economía circular y solidaria propuesto para las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Guerrero*

Aspectos y/o elementos del modelo de emprendimiento de proyectos productivos	***Descripción del elemento basado en la economía circular y solidaria identificados para el modelo de emprendimiento***
1. Actividades económicas	Identificar las actividades del contexto local, buscando conocer las labores principales y generación de economía en la que se desempeña la sociedad de la región. Se identificaron y clasificaron las actividades económicas en: primarias (agricultura, ganadería y pesca); secundarias (productos procesados y artesanías); y terciarias (comercio, turismo y servicios).
2. Economía circular	Integración de un modelo de producción sostenible, en función de las 3R (reutilización, reciclaje y rediseño) en las actividades económicas llevadas a cabo por la comunidad emprendedora de la región. Se incursionan mínimamente las 3R en las actividades de artesanías, comercio y productos procesados; en las demás actividades económicas no se integran.
3. Liderazgo y mercados solidarios	Desarrollar capacidades de organización y trabajo colaborativo para emprender nuevos proyectos económicos, desarrollar procesos y habilidades innovadoras, impulsando estrategias de mercados con organizaciones de diversos sectores permitiendo la toma de decisiones

	asertivas con fundamentación. Emprender proyectos productivos con impacto económico solidario y de carácter circular en función de las 3R con liderazgo efectivo, promueve el cuidado del medio ambiente, el aprovechamiento de los residuos y recursos naturales con responsabilidad social y bienestar de la comunidad.
4. Gestión tecnológica	Incursionar las tecnologías en los procesos de emprendimiento y en el desarrollo de las actividades económicas es fundamental. Integrar recursos y herramientas tecnológicas para la competitividad local es elemental y trascendental para la competitividad en mercados digitales globales. Se tiene el conocimiento de las convocatorias digitales y de algunas plataformas que promueven el financiamiento de proyectos productivos de desarrollo social; sin embargo, el desconocimiento para el manejo, la falta de infraestructura y recursos electrónicos se hace presente en las comunidades rurales y semiurbanas.
5. Vinculación	Articular el emprendimiento de la comunidad con los diversos sectores productivos, privado y/o gubernamental; apertura mayores posibilidades de concretar las actividades económicas, se generan oportunidades de crecimiento para la sociedad emprendedora impactando en el desarrollo local regional. Los procesos administrativos para concretar un proyecto o actividad económica son considerados un obstáculo para los emprendedores de la región; más bien los consideran trámites burocráticos y tediosos cuando son promovidos por las dependencias del sector público o privado, ya que se solicitan muchos requisitos e información mediante plataformas digitales complicadas.
6. Educación	Desarrollar habilidades y competencias mediante cursos, talleres y actividades acción participativa en la realización de las actividades económicas de la comunidad, sustenta, facilita y mejora el proceso de emprendimiento de los proyectos productivos. En el emprendimiento de los proyectos productivos basado en la economía circular, existe desconocimiento por parte de los emprendedores, no se promueve el principio de las "3R" (reducir, reciclar y reutilizar), ni el cuidado del medio ambiente durante el desarrollo de las actividades económicas de la región.

Fuente: elaboración propia.

Discusión

El análisis documental y descriptivo del proceso de emprendimiento señala oportunidades para la economía circular de las comunidades, especificando retos y desafíos que tendría que enfrentar la sociedad emprendedora. En la exploración realizada en el trabajo de campo, se enmarcaron actividades económicas clasificadas en tres categorías (primarias, secundarias y terciarias) asociadas con los emprendedores que impulsan los pequeños negocios, concluyendo que se podría integrar y aplicar la reutilización, el reciclaje y el rediseño (3R); además, de la gestión apoyada de las tecnologías en los

proyectos productivos. Documentar y comprender el manejo de los emprendimientos sociales a través del agronegocio en grupos asociativos rurales permite identificar oportunidades y darles valor social y económico por medio de proyectos de desarrollo local, los cuales se fortalecen con la labor integral, promoviendo la innovación y la sostenibilidad (Villota, 2023).

López et al. (2024) subrayan la importancia de incorporar estrategias de reutilización y reducción como elementos clave para una economía circular, puntualizando el rol que desempeñan los consumidores y las comunidades, pudiendo integrarse en la promoción del desarrollo sostenible. En efecto, promover estrategias de emprendimiento incursionado el rediseño, reutilización y el reciclaje en el desarrollo de proyectos productivos como una estrategia basada en la economía circular, contribuye al aprovechamiento y preservación de los recursos naturales generando impactos de crecimiento económico e impulso de la sostenibilidad.

A partir de la necesidad de realizar una adecuada gestión de residuos en los procesos industriales la economía circular ha puesto de relieve la importancia de pensar en la vida útil de los productos y en el impacto de estos en el ambiente; por consiguiente, la incorporación de un modelo de emprendimiento de economía circular busca reducir la huella ecológica de las actividades productivas y la degradación ambiental del planeta (Montaño Arévalo, 2018). Transformar la mentalidad del ser humano basado en las acciones de la investigación cualitativa y el diseño de nuevas estrategias que articulen la economía circular, el mercadeo y la responsabilidad social corporativa es tema relevante para la gestión de proyectos productivos y la sostenibilidad. (Rodríguez Hernández y Urrea Urrea, 2022).

La economía circular es un nuevo modelo de producción y consumo que busca garantizar un crecimiento sostenible en el tiempo. Al hablar de la reducción del consumo; se dirige, también, a la explotación de los recursos de manera responsable y aun mayor aprovechamiento de los residuos como nuevo recurso o materia prima (Ruiz-Cabrera, 2022). El desarrollo de la economía circular dentro de los sistemas productivos es de suma importancia para lograr un modelo de trabajo sustentable, porque se garantizan soluciones restaurativas que reducen desperdicios y se involucran actores externos para promover la recuperación que impacten en beneficios sociales, económicos y medioambientales (Díaz de la Rosa et al., 2023).

Aportar elementos de innovación a la economía circular proyecta un nuevo paradigma que describe un modelo económico global que fortalece las consideraciones sociales como inclusión y reducción de la pobreza que brinda alternativas de sostenibilidad integral a las condiciones de vida y evolución de la sociedad actual (Malagón-Vélez, 2021). Un modelo de negocios basado en estrategias de transición de una economía lineal a una sustentable o circular contribuye a la reducción de la brecha entre el crecimiento económico y el cuidado del medio ambiente (Jiménez Molina, 2023). Pino et al. (2024) consideran que un modelo de economía circular debe proponer estrategias claras y actividades detalladas que garanticen su viabilidad, innovación y aplicabilidad fomentando la creación de redes que promuevan el reciclaje, la reutilización y la sostenibilidad.

Conclusión

Las actividades económicas desarrolladas en las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Gro., presentan debilidades importantes respecto al aprovechamiento y preservación de los recursos naturales y/o materiales que se han venido utilizando durante el emprendimiento de los proyectos productivos; siendo una oportunidad en el proceso de uso y manejo para la economía circular; no se consideran aspectos para el cuidado del medio ambiente o conservación los recursos no renovables, recursos de vital importancia para la calidad de vida de la sociedad.

La sociedad emprendedora de las comunidades rurales y semiurbanas de Acapulco, Gro., realizan actividades económicas alineadas en las tres clasificaciones; primarias: agricultura, ganadería y pesca; secundarias: productos procesados y artesanías; y terciarias: comercio, turismo y servicios; sin embargo, no se percibe la incursión del elemento de la economía circular y solidaria; no contempla la reutilización, el reciclaje y el rediseño como una alternativa de aprovechamiento de los recursos de la región. En el desarrollo de las actividades económicas no se contempla el manejo adecuado de los recursos, el aspecto de los contaminantes, la conservación, la preservación, uso prolongado de la producción y consumo; se per-

cibe desconocimiento del aspecto de economía circular y la relación del emprendimiento con la dimensión ambiental y sostenible.

La propuesta de un modelo de economía circular diseñado para el emprendimiento de proyectos productivos promueve mejores prácticas responsables y concientización para el cuidado del medio ambiente. Es fundamental la preservación, la prolongación de productos y el uso responsable de los recursos durante el proceso de emprendimiento de los proyectos productivos. El diseño de economía circular contempló para la gestión del emprendimiento: la clasificación de las actividades económicas, la gestión de la tecnología, capacitación y conciencia ambiental, manejo adecuado (mejores prácticas) y producción y consumo buscando impulsar la sostenibilidad de las regiones.

El modelo de emprendimiento basado en la economía circular y solidaria es una propuesta de transformación en el que se debe involucrar a los diversos sectores de la sociedad que genera nuevas oportunidades, buscando contribuir al desarrollo económico, mejorar la calidad de vida y el bienestar de las comunidades. Por consiguiente, las actividades económicas desarrolladas por la comunidad emprendedora deben alinearse a los modelos circulares que impacte positivamente en la rentabilidad y la reducción de los costos, donde la reutilización, el reciclaje y el rediseño, contribuyan con una transformación económica responsable y sostenible en la región.

Referencias

Aguilar, E. E. (2024). Economía social y solidaria en Jalisco. *Intersticios sociales,* (27), 179-214. https://doi.org/10.55555/is.27.553

Andrade, G., Andrade, M., Suárez-Usbek, A., Bautista-Espinoza, H. y Haro-Haro, A. (2023). Impacto socioeconómico de la ganadería lechera en comunidades indígenas del ecuador. *EASI: Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Industria*, *2*(1), 34-43. https://doi.org/10.53591/easi.v2i1.1907

Bedolla Solano, J. J., Bedolla Solano, R. y Miranda Esteban, A. (2023). Prácticas digitales y sostenibilidad socioambiental en la educación básica de las *smart cities*. *Revista de Educación a Distancia (RED), 23*(72). https://doi.org/10.6018/red.533831

Bedolla Solano, J. J., Bedolla Solano, S. y Miranda Esteban, A. (2024). Gestión tecnológica y emprendimiento de proyectos socioeconómicos como estrategia de bienes-

tar y sostenibilidad en comunidades rurales y semiurbanas de Guerrero, México. En J. F. Sarmiento Franco (Coord.), *Sostenibilidad y desarrollo regional de cara a los desafíos socioambientales* (pp. 109-126). Universidad Nacional Autónoma de México / Instituto de Investigaciones Económicas / Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional.

Carrillo González, G. y Pomar Fernández, S. (2021). La economía circular en los nuevos modelos de negocio. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento, 9*(23), e2379933. https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2021.23.79933

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2022). *Informe de pobreza y evaluación 2022: Guerrero.* https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Documents/Informes_pobreza_evaluacion_2022/Guerrero.pdf

Damián Simón, Javier. (2022). Desarrollar proyectos productivos en zonas rurales e indígenas del Estado de Oaxaca: Experiencias estudiantiles. *Acta Universitaria, 32,* e3298. https://doi.org/10.15174/au.2022.3298

Díaz de la Rosa, J. D., Hernández Chavarria, J., Murillo, A. E. y Lechuga Névarez, M. R. (2023). Análisis de la economía circular en el proceso de elaboración del mezcal en el municipio de Nombre de Dios, Durango. *Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca, 9*(no. esp.), 36-49. https://doi.org/10.29057/est.v9iEspecial.11481

Gómez-García, C. R. (2024). Economía circular en México: casos de éxito y desafíos frente al covid-19. *Revista Científica Profundidad Construyendo Futuro, 20*(20), 15-28. https://doi.org/10.22463/24221783.4318

Guerrero-Villegas y Wilma, Matilde. (2024). Economía circular en contextos locales: Caso Ecuador. *Revista Direito GV, 20,* e2430. https://doi.org/10.1590/2317-6172202430

Jiménez Molina, M. A. (2023). *Desarrollo de un modelo de economía circular para la industria de plásticos reciclables en el cantón Latacunga.* UTC. Latacunga. https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10659

Llaque Lino, J. L., Illingworth Gamboa, J. W., Oleas Vélez, X. J. y Piedra Arévalo, K. A. (2024). Análisis de los emprendimientos comunitarios en el cantón Milagro, Ecuador, a partir de experiencias en países hispanohablantes. *Ciencia Latina: Revista Científica Multidisciplinar*, *8*(5), 13522-13550. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14810

López, J. A. S., Farfan, I. S. P. y Espinosa, J. E. N. (2024). Convergencia temática entre economía social y optimización circular: Un análisis de estrategias empresariales y desafíos globales. *Delos, 17*(62), e3459. https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n62-231

Lozano Montero, E. y López Salazar, A. (2023). *Tecnología digital y su influencia en el emprendimiento.* Comunicación Científica / Universidad de Guanajuato. https://doi.org/10.52501/cc.139

Malagón-Vélez, L. E. (2021). Social and solidarity economy conceptual contributions to the circular economy. *Cuadernos de Administración, 37*(70), e5010824. https://doi.org/10.25100/cdea.v37i70.10824

Mastellone, A. D. (2022). *Modelos de negocios enfocados en la economía circular y sus impactos.* Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Escuela de Econo-

mía y Negocios. https://ri.unsam.edu.ar/bitstream/123456789/2155/1/TFPP%20EEYN%202022%20MAD.pdf

Montaño Arévalo, A. C. (2018). Economía circular, un modelo de transformación. *Revista Tecnológica Ciencia y Educación Edwards Deming, 2*(1), 22-36. https://doi.org/10.37957/ed.v2i1.7

Ortega Anguiano, G. (2023). *Innovación social con agro-cultura y economía circular solidaria para el desarrollo sostenible de comunidades urbanas vulnerables.* Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://hdl.handle.net/20.500.12371/20128

Pino, C., Vásquez, M., Orfa, J. y Peña, R. (2024). Modelo de economía circular para los institutos técnicos y tecnológicos. *Universidad, Ciencia y Tecnología, 28*(125), 121-132. https://doi.org/10.47460/uct.v28i125.862

Rangel Saltos, J. E., García Noboa, J. P. y Vera Basurto, J. S. (2022). Economía circular y emprendimiento sostenible. *RECIAMUC, 6*(3), 63-70. https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.(3).julio.2022.63-70

Rodríguez Arias, G. C. (2023). *Modelo de granja integral con enfoque en economía circular para pequeños productores agropecuarios estudio de caso: Finca el Encenillo Nuevo Colón, Boyacá.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas. https://hdl.handle.net/11349/39957

Rodríguez Brito, R, Castro Fabra, E y Estrada Villafañe, L. (2023). *Las estrategias de innovación social aplicables para la economía circular en el sector bananero, para su aplicación como alternativa de diversificación agroindustrial de sus procesos.* Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ciencias Económicas, Administrativas y Contables, Administración de Empresas, Santa Marta. https://hdl.handle.net/20.500.12494/51258

Rodríguez Hernández, R. H. y Urrea Urrea, F. (2022). Economía circular, mercadeo y responsabilidad social corporativa: prácticas de una empresa maderera que aportan al fortalecimiento de capacidades empresariales. *Economía y Negocios, 4*(2), 169-191. https://doi.org/10.33326/27086062.2022.2.1452

Rosero Figueroa, J. C. A., Jajoy Tisoy, J. D., Mendoza Chacón, J. H., Segura Mosquera, J. M. y Arciniegas Sánchez, N. F. (2024). Diseño de un modelo de economía circular para el proceso de producción de la industria licorera del Cauca. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *8*(1), 6591-6605. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.10023

Ruiz Cabrera, G. L. (2022). Economía circular: ¿Un enfoque económico en la producción o en el ser humano y el medio ambiente? *Revista de la Academia,* (33), 84-92. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9557412

Salgado-Tello, I., Sánchez-Herrera, T., Oleas-López, J., Vaca-Cardenas, M. (2024). Economía circular para el desarrollo agroindustrial y social en Ecuador. *Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, 26*(1),297-322. www.doi.org/10.36390/telos261.19

Villota, L. (2023). Caracterización y sostenibilidad del emprendimiento social rural en agronegocios asociativos del sur de Nariño. *Tendencias, 24*(1), 130-159. https://doi.org/10.22267/rtend.222302.215

Segunda Parte

RECURSOS NATURALES Y SECTORES PRODUCTIVOS: HACIA LA CIRCULARIDAD

5. Potencial de circularidad en el sector minero de México

Gabriela Muñoz Meléndez[1]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.05

Resumen

La minería es crítica para la economía de las naciones porque es un generador de empleos, un atractor de inversiones y una fuente de divisas; la importancia del sector se acrecentará por su papel de proveedor de minerales críticos para la transición energética. Sin embargo, la industria minera también tiene un largo registro de impactos ambientales y sociales. México es un país con una larga tradición minera, produce 53 tipos de minerales: 11 metálicos y 32 no metálicos. Por 13 años ha sido el mayor productor de plata en el mundo. Empero, 1 609 millones de hectáreas de operaciones mineras se llevan a cabo dentro de 62 de las 142 áreas naturales protegidas y, dado que la actual gestión de desechos mineros se basa en una Economía lineal, los impactos ambientales y conflictos socioambientales son amenazas reales; que en no pocas ocasiones se han concretado en desastres. Este documento tiene como objetivo identificar el avance en la implementación de prácticas circulares en el sector minero nacional; mediante una revisión bibliográfica de documentos académicos y un análisis de contenido de los reportes de sustentabilidad de corporaciones mineras operando en México. Los resultados muestran que hay un alto potencial de adopción de estrategias de circularidad en el sector minero mexicano. Los esfuerzos para cerrar procesos en la industria minera son aún incipientes e inciertos sobre si guiarán a la circularidad efectiva del sector.

[1] Doctora en Ciencias Ambientales. Docente en el Colegio de la Frontera Norte, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8898-5048

Palabras clave: *circularidad, economía circular, minería, México, análisis de contenido.*

Introducción

Alrededor del mundo, la industria minería tiene una mala imagen por la negligencia con la que se ha tratado a las comunidades donde opera y por la larga historia de desastres ambientales que ha provocado (Nurmi, 2017). A través de la colección de datos históricos (1915-2021) sobre fallas en presas de relaves obtenidos de las siguientes agencias internacionales: la Comisión Internacional de Grandes Presas y el Programa Ambiental de la Naciones Unidas (al 2001), el Centro de Ciencia Ciudadana (a partir de 1915), y la Información Mundial sobre Energía (desde 1960), se identificaron 366 accidentes en las lagunas de jales, liberando 279 114 891 m^3 de relaves, que se desplazaron 4 868.15 km y arrebataron la vida a 3 043 personas a nivel mundial (García et al., 2024).

Las cifras antes citadas abonan a la suspicacia del público en general acerca de la necesidad del sector en el futuro, empero el creciente rechazo de la minería no se traduce en una reducción significativa del consumo de productos derivados de la industria minera tales como celulares, infraestructura energética, automóviles, paneles solares, turbinas de aerogeneradores y materiales para la construcción. La demanda de productos derivados del sector minero no parece sino aumentar debido a la transición energética, en particular la requisición de los denominados metales y minerales críticos tales como cobre, níquel, cobalto, litio y tierras raras.

En 2023 la demanda de litio se incrementó en 30%, en tanto que el aumento de los requerimientos de níquel, cobalto, grafito y tierras raras creció entre 8 a 15%. Se ha estimado que la demanda de minerales críticos para tecnologías de energía limpia se duplicará al 2030 bajo el actual escenario de políticas climáticas en el mundo; sin embargo, debajo un escenario de compromisos anunciados donde se cumplirían todos los compromisos climáticos por gobiernos e industrias, la requisición se triplicaría para 2030 y cuadriplicaría para 2040, con el litio como el metal crítico que más crecería por el alza de vehículos de batería eléctrica; y con el cobre

como el metal de mayor producción para atender las necesidades del sistema eléctrico. En un entorno de emisiones cero, el requerimiento de grafito se cuadriplicará para 2040, en tanto que la demanda de níquel, cobalto y tierras raras se duplicará (EIA, 2024).

Ante la importancia actual de la minería como cimiento de la economía de los países por ser generador de empleos, ingresos, y divisas. Además, por la creciente relevancia futura del sector en la transición energética, las tecnologías limpias y el desarrollo bajo en carbono. Y finalmente porque aún no se ha encontrado sustitutos mediante el reciclaje que remplacen enteramente la extracción primaria (Allwood, 2014). La industria minera sigue y seguirá siendo relevante por lo que de manera urgente debe mejorar sus prácticas tales como el uso extensivo de tierra, agua y energía, la alta generación de residuos, su baja resiliencia climática, y la falta de licencia social para operar en las comunidades locales.

Se han buscado modelos de sustentabilidad para el sector minero mientras se mantiene la rentabilidad financiera, con respeto ambiental y responsabilidad social; es así como surge el concepto de minería verde *(green mining),* entendido como una gestión integral de indicadores productivos y sostenibles que promueven

> la eficiencia en el uso de recursos, agua y energía; la seguridad, inclusión, empoderamiento y calidad de vida de las personas y comunidades; la resiliencia frente al cambio climático; la incorporación de principios circulares, minimizando las emisiones y residuos generados, adoptando crecientemente energías renovables y tecnologías en sus procesos, integrando la digitalización, trazabilidad y verificación por parte de terceros como parte integral de sus procesos, de forma comprometida con la biodiversidad e inclusión de sus territorios, y bajo un modelo de gobernanza transparente, participativo y moderno. (Lucchini et al., 2021, p. 13)

No han faltado las críticas al concepto de minería verde ni la incredulidad generalizada de que el sector pueda volverse sustentable. La noción ha sido calificada de absurda y con el objetivo primordial de hacer un "lavado verde" a un modelo destructivo y que tiene una alta probabilidad de conducir a transiciones injustas e inequitativas. Si realmente se persigue una

transición justa se debe apostar por transformaciones fundamentales en todos los niveles de la economía y la sociedad, y eso involucra directamente al sector básico de las cadenas de valor de múltiples productos: la industria minera.

Alrededor del mundo hay iniciativas para impulsar el desarrollo e implementación de la minería verde, entre las cuales destacan la iniciativa de Minería Climáticamente Inteligente del Banco Mundial (World Bank, 2025), que busca identificar potenciales prácticas climáticamente inteligentes a lo largo de la cadena de valor desde la minería hasta la disposición; esta iniciativa descansa en cuatro pilares: (1) Soluciones bajas en/cero carbono, (2) Resiliencia y adaptación, (3) Economía circular y (4) Oportunidades de Mercado, que son atravesados por tres temas transversales: (a) buena gobernanza, (b) participación inclusiva y (c) innovación y capacitación.

Otra idea es la del Consejo Internacional de Minería y Metales (International Council of Mining and Metals) (ICMM, 2024), que busca reforzar requisitos ambientales y sociales entre sus miembros usando un proceso de implementación que incluye validación en sitio, garantías creíbles y transparencia, a través de la adopción de 10 principios: (1) Ética de negocios, (2) Toma de decisiones, (3) Derechos humanos, (4) Administración de riesgo, (5) Salud y seguridad, (6) Desempeño ambiental, (7) Conservación de la biodiversidad, (8) Producción responsable, (9) Desempeño social y (10) Participación de los interesados.

Debe añadirse que estas iniciativas distan de ser las únicas en la industria, de hecho, hay múltiples estándares y medidas desarrolladas por diversas instituciones, algunas generales otras específicas, que comparan y miden objetiva o subjetivamente las prácticas responsables de las compañías mineras. Además, existen múltiples estudios y reportes sobre la implementación de tecnologías y adopción de prácticas de minería verde, un buen recuento es el de Onifade et al. (2024), donde se reportó que las tecnologías y prácticas verdes sostenidas en integración tecnológica y con un marco regulatorio apropiado, mejoran el desempeño ambiental del sector al mismo tiempo que aumentan la eficiencia económica, entre dichas mejoras se contaron las reducciones de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y consumo energético a la vez que se optimizó la gestión de residuos mineros. En este estudio se presentaron ejemplos de tecnologías

de minería verde ya operando en EUA, Canadá, China, Australia, India, Nigeria, Suecia, Reino Unido y Sudáfrica.

En el caso de Latinoamérica y el Caribe (LAC), en particular Brasil, Chile, Perú, y Colombia, en un estudio se compararon las legislaciones locales que promueven prácticas de minería verde contra estándares internacionales tales como *Towards Sustainable Mining, International Finance Corporation, Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development, Fraser Institute and the Natural Resources Governance Institute* usando el marco conceptual de Gobernanza Ambiental y Social. De esta comparación se derivó una hoja de ruta con 20 intervenciones para que sean implementadas por los gobiernos en dos etapas (una fundacional y la otra de desarrollo) en cinco ejes (Rojas-Hayes, Casas y Sucre, 2023): (1) Eficiencia del uso de recursos, (2) Economía circular, (3) Transición energética, (4) Calidad de vida e inclusión y (5) Trazabilidad, digitalización y transparencia.

En ese estudio se concluyó que hay una vasta oportunidad de mejora en los usos eficiente de agua y energía, la conservación de biodiversidad, la mitigación y adaptación al cambio climático, y una mayor participación comunitaria. Y se reconoció que abrazar principios de economía circular y gestión integral de residuos serían fundamentales en el manejo de relaves, el cierre de minas e impactos ambientales. Por otro lado, y en concordancia, la importancia de la adopción de prácticas circulares en la minería, ha sido resaltada como la forma de atender el inicio de la cadena de valor de la mayoría de los productos y las pérdidas que se presentan en ella (Lebre, Corder y Golev, 2017).

Ante la aparente falta de consideración de una importante nación minera en LAC como México, este documento busca identificar los avances de la adopción de prácticas circulares en su industria minera, por lo cual se inicia presentando el estado del sector, seguida de la explicación de los dos métodos aplicados para identificar tales prácticas: un análisis de contenido de los reportes de sustentabilidad de empresas mineras selectas operando en México, así como un análisis bibliométrico de documentos académicos. Después se presentan y discuten los resultados. Finalmente, se cierra con conclusiones.

El sector minero en México: aspectos económicos, sociales y ambientales

En términos económicos, hacia octubre de 2021, existían 25 702 concesiones mineras vigentes en el país, cubriendo un total de 20 853 731.2 hectáreas (ha) lo que equivale a 10.7% del área total de la nación. Al cierre de 2023, 322 empresas operaban: 165 de participación nacional y 157 de participación extranjera en su capital social; de éstas últimas, los dos capitales más importantes provenían de Canadá o los EE. UU., con 75.8% y 11.5%; respectivamente. Las empresas de capital nacional y extranjero operaban 535 proyectos mineros, 373 eran de compañías extranjeras y 162 de origen nacional.

Los proyectos se ubican primordialmente en Sonora (124), Chihuahua (61), Durango (61) y Zacatecas (34). La participación del sector minero-metalúrgico en el producto interno bruto (PIB) nacional fue del 2.7%, y del 8.6% del PIB industrial. El valor de la producción de metales industriales no ferrosos disminuyó 15.2% y 17.8% para los metales preciosos; los minerales no metálicos se redujeron en 0.1%, y los minerales siderúrgicos en 52.3%. De enero a diciembre de 2023, México registró 36 058 millones de dólares estadounidenses por Inversión Extranjera Directa, esto es 2.2% más que la reportada para el mismo periodo de 2022 y la más alta desde que se tiene registro (AGM, 2024). La relevancia de México en la minería mundial se resume en la tabla 5.1.

Al 2024 se reportaron la presencia de 124 operaciones minero-metalúrgicas de las cuales 53 eran subterráneas, seis mixtas, 31 plantas y 34 fueron minas a cielo abierto, estas últimas generan el 59% del valor de la producción de la minería no petrolera (CEFP, 2024).

En relación con aspectos sociales, las actividades mineras se llevaron a cabo en 690 comunidades de 212 municipios en 24 estados de la República Mexicana, 30 municipios representan el 66.5% del valor total de su 27.0% de producción. El promedio de municipios mineros posee un desarrollo humano alto, y rezago y marginación sociales bajos (Alanis Ortega, 2021). Al 2023, las actividades mineras generaron 416 875 empleos, esta cantidad tuvo una disminución del 0.1% con respecto al año anterior. De este nú-

Tabla 5.1. *La posición de México en la producción mundial de minerales metálicos y no metálicos, 2022-2023*

Producto	*Posición de México en la producción mundial*	*Porcentaje de participación*
	Minerales metálicos	
Plata	1	27.3
Plomo	3	8.1
Molibdeno	5	10.3
Cadmio	5	4.5
Oro	6	3.7
	Minerales no metálicos	
Fluorita	2	32.2
Wollastonia	2	13
Celestita	4	12.2
Diatomita	5	3.91
Barita	6	5.5

Fuente: SGM (2014).

mero de trabajos, 17.9% fueron ocupados por mujeres (74 529) cifra que mostró un aumento de 3.3% en comparación al 2022 (IMSS, 2023). Para 2023 el salario promedio del sector minero-metalúrgico fue de 630.36 pesos, monto superior al promedio nacional de 537.87 pesos y representó un aumento de 11.0% respecto al 2022.

Por otro lado, de acuerdo con el Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL) (2025). En el periodo de 2020 a 2025, había 28 conflictos mineros sucediendo en 29 estados de la república, casi 30% se dieron en Zacatecas seguido de Oaxaca en proyectos que tenían como objetivo extraer oro (en 33% de los casos) seguido de plata (26%). La mayoría de las minas (62%) donde se presentaron los conflictos están actualmente en operación seguidas de aquellas que estaban a punto de cerrar (16%). La mitad de las minas cuyas operaciones tenían asociados conflictos poseían capital canadiense seguida de minas mexicanas (16%). Los impactos sociales que se reportaron fueron sobre todo daños a la salud (16%), seguido de despojo del territorio (9%), represión a la protesta, afectaciones a las viviendas por detonaciones y criminalización de activistas (7%), y hostigamiento, intimidación, desplazamiento forzado, asesinato y falta de consulta (5%).

Finalmente, en relación con los impactos ambientales; 1 609 millones de ha de operaciones mineras se llevan a cabo dentro de 62 de las 142 áreas naturales protegidas, aunque los impactos sobre los ecosistemas no han sido dimensionados. Por su parte, la mayoría de los conflictos socioambientales reportados por la OCMAL se dieron por la contaminación de ríos, pozos agrícolas y demás cuerpos de agua que abastecen a las comunidades y sostienen sus actividades agropecuarias. Más si de impactos ambientales se trata, los accidentes en las lagunas de jales tienen el mayor potencial de afectación; en el periodo de 2020 a 2025 se registraron dos incidentes, el primero sucedió en Concordia Sinaloa en 2021 cuando posiblemente debido a las intensas lluvias provocadas por el huracán Pamela, la laguna de relaves se derrumbó y los jales se integraron al arroyo el Florido, tributario del río Pánuco. El segundo accidente ocurrió en mayo del 2020 en Durango cuando casi 6 mil metros cúbicos de jales se derramaron cubriendo 8 000 m^2 de tierra, alcanzando la corriente San Bernabé (CSP2, 2025).

Métodos

Una revisión bibliográfica para conocer el avance de la adopción de estrategias de economía circular en el sector minero en México se llevó a cabo en tres pasos; el primero consistió en la colección de datos en el periodo 2020-2025 de bases de datos especializadas tales como Google Scholar, y Scopus, usando operadores boleanos y las siguientes palabras claves —tanto en inglés como español—: *mining* + Mexico + *"circular economy"* o *circularity* o *closed-loop* o *material circularity* o *reuse* o *refuse* o *repurpose* o *recycling;* de este ejercicio se colectaron 32 documentos. El segundo paso consistió en la revisión y selección de documentos obviando aquellos que sólo mencionaran de manera incidental el tema; por ejemplo, mencionar que el país es el productor mundial de algún mineral particular; esta etapa dejó 16 documentos relevantes para la temática: 12 artículos, una tesis doctoral, un reporte, un capítulo de libro y un artículo de conferencia. La revisión bibliográfica se realizó sobre esos documentos, lo que consistió el tercer y último paso.

Además, se realizó un análisis de contenido sobre los reportes de sustentabilidad para 2023 en tres pasos; el primero fue la selección de cuatro documentos; dos en español correspondientes a empresas mexicanas: Grupo México y Grupo Peñoles. Y dos en inglés de las empresas extranjeras: Newmont Co. de capital estadounidense y Alamos Gold Inc. de capital canadiense. El segundo paso fue la elección de las secciones ambientales de cada archivo que, en general, proporcionaba información sobre las medidas y estrategias empresariales en Cambio Climático, Calidad del Aire, Agua, Biodiversidad, Residuos y Cierre de Mina. Sobre los archivos ambientales se aplicó un análisis de contenido usando el paquete Quanteda (Benoit et al., 2018) versión: 4.0.2 de R versión 4.4.3 (2025-02-28) para Mac; siguiendo el método de Giménez (2024).

Resultados y discusión

Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica sobre la adopción de circularidad en el sector minero mexicano reveló que el tema ha sido escasamente estudiado (véase tabla 5.2); en el periodo analizado de 2020 a 2025 el número de publicaciones parece seguir un comportamiento bimodal con la mayoría de las publicaciones (31%) al inicio del intervalo, véase la figura 5.1. Empero en contraste con el escaso número de documentos, los objetos de investigación son diversos y copiosos como lo indican las 46 palabras claves asociadas; si hay un interés prioritario son los relaves mineros (con hasta tres menciones) fuera de las expresiones: Minería (4), Economía circular (3) y Sustentabilidad (2). El número de autores también es nutrido: 52, con solo tres autores participando hasta en dos publicaciones: Amabilis-Sosa L. E., Pat-Espadas A. M. y Téllez Ramírez I. De las 11 revistas especializadas que han publicado artículos en el tema, solo *The Extractive Industries and Society* ha publicado hasta dos artículos.

Por otro lado, la producción académica provino de 16 instituciones nacionales y cuatro internacionales, de las cuales la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) participó en 11 de los 16 trabajos seleccio-

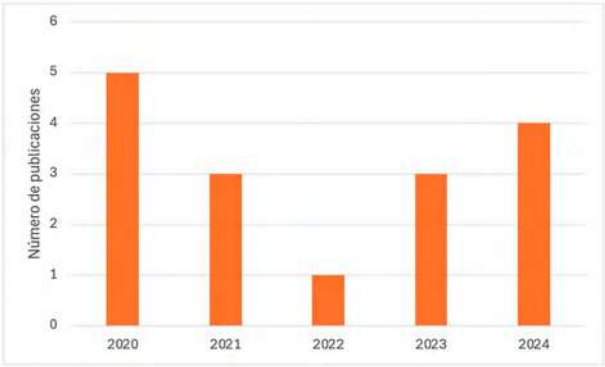
Tabla 5.2. *Publicaciones sobre economía circular en la minería mexicana, 2020-2024*

Título	*Autores*
El derecho económico, la minería y la economía circular en México	Witker, 2023
Data integration of critical elements from mine waste in Mexico, Chile and Australia	Villa Gomez et al., 2022
Articulación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible con el paradigma de la economía circular	Rivera Acosta y Martínez Torres, 2021
Economía circular en minería: nanopartículas en tecnologías de remedición del medio ambiente y microelectrónica a partir de residuos minerales y agrícolas (Tesis)	Gándara Martínez et al., 2023
Mining, water and society: recycling of mining effluents as a social solution to the use of water in Mexico (Capítulo de libro)	Bazúa-Rueda et al., 2020
Resiliencia en actividades mineras (arti1culo de conferencia)	Jaime y Sanabria, 2021
La gramática del Río Sonora que exhibió el derrame de la mina de Cananea	Agraz y Murphy, 2020
Efectos multisectoriales de la ausencia simulada de la actividad minera en México: un análisis de impactos con un modelo de extracción hipotética.	Gaytán-Alfaro, 2020
Efectos multidimensionales de la minería en San José del Progreso, Oaxaca	Azamar Alonso y Téllez Ramírez, 2021
Procedimiento para la rehabilitación ambiental de las minas abandonadas. Aplicación a minas de recursos pétreos en la comunidad de San Pablo Autopan, Estado de México	Mondragón de Jesús et al., 2024
Minería a microescala para el desarrollo regional sostenible: Análisis exergético de un caso en Guerrero, México (2022).	Real-Cornejo et al., 2023
Mining-metallurgical monopoly capital in Mexico, 1960--2023	Téllez-Ramírez y Sánchez-Salazar, 2024
Mining struggles in north-central Mexico: Between mining tradition, poverty, and environmentalism	Toscana-Aparicio y Uribe-Sierra, 2024
Reuse of Mine Tailings as an Alternative for the Manufacture of Refractory Bricks: Sustainable Remediation for Mining Waste Management	Puy-Alquiza et al., 2024
Stabilization of potentially toxic elements contained in mine waste: A microbiological approach for the environmental management of mine tailings	Valenzuela et al., 2020
The circular economy in Latin America and the Caribbean (Reporte)	Schröder et al., 2020

Fuente: elaboración propia.

nados, seguida por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) participando en tres, y las Universidades de Guanajuato (UG) y Guerrero (UAGro) con dos intervenciones cada una. El 56% de las instituciones mexicanas colaboraron con instituciones internacionales, por ejemplo, la UNAM, el IPN, y el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí colaboraron con la Universidad de Queensland de Australia. Por su parte, la UNAM, el Instituto Tecnológico de Culiacán, la UG, y la Universidad Veracruzana (UV) trabajaron conjuntamente con la Universidad de la Habana en Cuba. Por otro

Figura 5.1. *Número de publicaciones sobre circularidad en la minería mexicana, 2020-2024*



Fuente: elaboración propia.

lado, la UAM cooperó con la Universidad Católica de Temuco de Chile. Finalmente, el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) de Sonora y la Universidad de North Carolina en EUA concurrieron en un estudio.

Los enfoques temáticos cubiertos por los documentos son múltiples y van de lo general a lo local, de lo técnico a lo socioambiental, incluyendo aspectos legales y sociológicos. Así, en la primera clasificación en un estudio sobre oportunidades de adopción de la economía circular, en Latinoamérica y el Caribe se identificó al sector minero y extractivo como una de las tres prioridades a atender en la región, empero se reconoció que la adopción de prácticas circulares en la minería debería incorporar consideraciones ambientales y sociales (Schröder et al., 2020). Otro estudio general que aparentemente no está relacionado con la economía circular pero que bien podría sentar un esquema integral para la implementación de circularidad, describe el desarrollo de un marco de resiliencia interna y externa en cuatro dimensiones: técnica, organizacional, económica y social para operaciones mineras (Jaime y Sanabria, 2021).

A un nivel meso, un estudio teórico de corte económico evaluó el impacto de la omisión simulada, total o parcial, de la actividad minera en la economía mexicana. Los resultados mostraron que la fabricación de equipos de transporte (subsector 336), edificación (236) y fabricación de pro-

ductos a base de minerales metálicos y no metálicos (327) serían los subsectores que se verían mayormente afectados por el desabasto de los productos mineros; el autor concluyó que este tipo de ejercicio sería adecuado para el análisis de los efectos de políticas públicas y reformas estructurales que afecten de manera directa o indirecta al sector minero. Si bien este estudio no es sobre economía circular *per se,* más si demuestra las consideraciones a tomar ante la adopción de estrategias circulares en la minería (Gaytán-Alfaro, 2020).

Otra investigación buscó definir indicadores relacionados con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Industria, Innovación e Infraestructura (ODS 9), y Producción y Consumo Responsable (ODS 12) para el sector minero-metalúrgico desde la perspectiva teórica de la economía circular; tales indicadores fueron ensayados sobre la operación de una mina subterránea de plata en Zacatecas que cuenta con capital canadiense (Rivera Acosta y Martínez Torres, 2021). Otro estudio de corte jurídico propuso el hipotético marco legal de la minería bajo preceptos de circularidad para los nuevos minerales como el litio considerando los tratados de libre comercio, el derecho económico, y la economía circular (Witker, 2023).

Una investigación de corte histórico, para el periodo 1960 al 2023, evaluó la evolución del capital monopolista en el sector minero metalúrgico, en particular de los consorcios mineros mexicanos: Grupo México y Grupo Peñoles; encontrando que el enriquecimiento de éstos fue acompañada de un incremento de conflictos socioambientales (Téllez-Ramírez y Sánchez-Salazar, 2024), nuevamente si bien este estudio no se centra directamente en la circularidad muestra potenciales obstáculos para adoptar tales iniciativas.

La mayoría de los estudios identificados (69%) se encuentran en el nivel más puntual y local. Un análisis cartográfico de conflictos socioambientales en sitios mineros de Sonora y Zacatecas mostró el contraste entre el discurso de empresas mineras y el sector gubernamental, y las comunidades cada vez menos dispuestas a permitir la instalación de actividades mineras (Toscana-Aparicio y Uribe-Sierra, 2024). A su vez, un análisis multidimensional considerando cinco criterios: (1) institucional, (2) social, (3) económico, (4) cultural y (5) ecológico (cada uno con tres compo-

nentes) se utilizó para categorizar los efectos del extractivismo minero en el ejido San José, municipio de San José del Progreso, Oaxaca. La mina en cuestión es subterránea, y operada desde 2006 por la compañía minera Cuzcatlán, Sociedad Anónima de Capital Variable, filial de la corporación canadiense Fortuna Silver Mines. Los resultados mostraron que los beneficios de la empresa no se vieron reflejados en bienestar de la comunidad o el Estado (Azamar Alonso y Téllez Ramírez, 2021).

Por otro lado, se analizó un tratamiento biológico de agua proveniente de los procesos de flotación de una planta metalúrgica donde se producen sulfatos de zinc, cobre y plomo de una mina de cobre localizada en el Estado de México; buscando caracterizar la viabilidad del uso de tal agua en comunidades cercanas o en las propias actividades de la mina; este estudio surgió de una colaboración de larga data entre la academia y la mina comunitaria, y es presentada como una buena práctica para resolver problemas del sector minero (Bazúa-Rueda et al., 2020).

Por su parte, se valoraron los jales como fuente de recursos secundarios, del análisis de 159 muestras se encontró que existe un potencial para bismuto, antimonio, tungsteno, indio, zinc y molibdeno en el estado de Sonora (Villa Gómez et al., 2022). Otra investigación en la forma de tesis doctoral aplicó métodos de nanotecnología en materiales para aplicar a la economía circular en minería, usando óxidos de cobre (CuO) y silicio (SiO_2) y métodos de química verde, utilizando desperdicios de frutas. El material resultante del óxido de silicio fue un removedor de colorantes en aguas contaminadas (Gándara, 2023).

Una investigación analizó la gramática social, o el conjunto de componentes articulados de forma tal que den paso a una configuración sistémica dada, que conforman la base de una coherencia implícita en el funcionamiento social. Dicha gramática social se estudió en el río Sonora después del derrame de 40 000 m^3 de sulfato de cobre, proveniente de la mina Buenavista del Cobre, subsidiaria de Grupo México, y ubicada en Cananea. El método aplicado fueron entrevistas semiestructuradas a diversos actores en las comunidades aledañas o no al río (Luque y Murphy, 2020).

También se propuso un procedimiento para la rehabilitación de minas abandonadas que se dedicaban a la extracción de materiales pétreos, usando indicadores geológicos-geomorfológicos, hídricos, ecológicos y socioe-

conómicos, adecuados a las características de la comunidad San Pablo de Autopan, Estado de México (Mondragón et al., 2024). Además, se reflexionó como la minería a microescala o gambusina representa una oportunidad para el desarrollo social y económico de algunas comunidades rurales; tal hipótesis fue probada en el distrito minero de Coyuca de Catalán, Guerrero, México, estimando el análisis de costos de exergía de las operaciones de extracción y refinación de oro, para conocer los costos ocultos que impactan la actividad minera de los gambusinos. Los resultados mostraron que el consumo de agua y mercurio son los elementos que más afectan a la comunidad (Real-Cornejo, Maldonado-Astudillo y Plascencia, 2022).

Existen dos estudios que sí presentan ejemplos típicos de circularidad en el sector minero, el primero expuso las características físicas, mecánicas y químicas de ladrillos fabricados con relaves de minas de plata de la compañía La Cooperativa en Guanajuato; los ladrillos resultaron ser resistentes a las condiciones ácidas y también ser refractarios, con un alto potencial para ser usados como material de construcción tanto en sectores domésticos como industriales (Puy-Alquiza et al., 2024). El segundo estudio evaluó la factibilidad de la reducción microbiana de sulfatos como estrategia de gestión de residuos mineros, el método fue probado en muestras provenientes de dos minas abandonadas en Sonora. Los resultados mostraron un alto potencial de remoción de metales de los residuos mineros (Valenzuela et al., 2020).

Como se observa, de esta revisión bibliográfica, los avances de la adopción de circularidad en el sector minero mexicano son incipientes y fragmentados según lo reportado en estudios académicos, sólo dos prácticas podrían conducir a la circularidad: revaloración y uso de relaves, y uso de agua tratada de procesos metalúrgicos. En la tabla 5.3 se listan ejemplos de prácticas circulares en la minería.

Análisis de contenido de los reportes de sustentabilidad de las empresas mineras mexicanas

El análisis de contenido en español para los reportes de sustentabilidad 2023 del Grupo México y del Grupo Peñoles mostró que el concepto de "econo-

Tabla 5.3. *Ejemplos de prácticas circulares en la minería*

Práctica circular	*Ejemplo*
Recuperación y reciclaje de material	Uso de relaves para crear materiales de construcción Deshidratación de relaves Reúso de agua tratada proveniente de procesos metalúrgicos
Incorporación de avances tecnológicos del reciclaje de residuos mineros para reducir el consumo de material virgen	Incremento de capacidad de reciclaje de rebabas de hierro y acero procesados en hornos oxigenados o de arco eléctrico o mediante separación magnética y tecnologías químicas no convencionales como la calcinación
Automatización e incorporación de sensores de control en procesos mineros para mejorar la seguridad y aumenta la eficiencia de las operaciones	Uso de sensores para gestionar las demandas de agua y energía Automatización de procesos de separación (flotación de partículas grandes)
Diseño circular de equipo y procesos mineros	Apilamiento de deshidratación hidráulica en el manejo de la laguna de jales crea un almacenamiento seguro y estable al mismo tiempo que recupera agua Electromovilidad de camiones de transporte de carga
Disposición y desamble sustentable mediante el diseño de sistemas regulatorios y productos resilientes, trazables, adaptable, y eficientes	Diseño de políticas que establezcan la obligatoriedad de licencias de operación, certificación, capacitación en sustentabilidad y transición para el cierre de la mina y su monitoreo posterior
Adopción de un modelo de negocios más sustentable por parte de las empresas mineras	Creación de un sistema producto-servicio que incorpore tecnologías digitales, modularidad para mejorar el desempeño de equipos mineros para reducir perdidas con un monitoreo continuo

Fuente: elaboración propia basada en Antony et al. (2024) y Vargas et al. (2022).

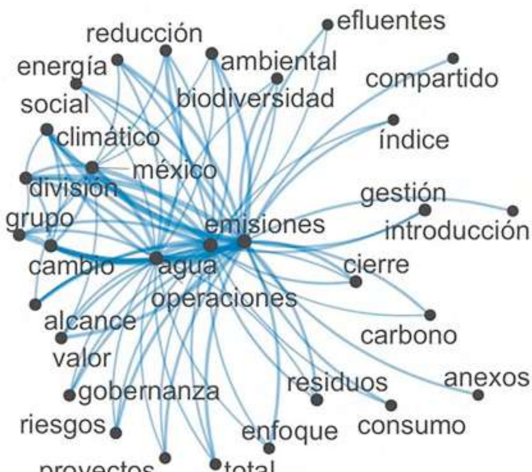
mía circular" es escasamente considerado, el término aparece sólo en un par de ocasiones en el reporte del Grupo México, en una ocasión estuvo ligado a la gestión de residuos mineros. Por otro lado, se buscaron en los textos la presencia de prácticas circulares usando N-gramas, es decir palabras coocurrentes que aparecen con frecuencia en un contexto dado, por ejemplo "deshidratación", "electromovilidad de transporte" o "reúso de agua tratada", dichos vocablos fueron derivados de la tabla 5.3; al final del ejercicio no se encontraron resultados para los bi-, tri- y cuatrigramas preparados. En la figura 5.2 se muestra la nube de palabras de ambos documentos, es decir un gráfico que permite la rápida visualización de los términos más frecuentes.

Como se observa, las emisiones asociadas al cambio climático y agua son las principales preocupaciones ambientales para ambas empresas. Los dos términos pueden estar asociados (concurrentes) como lo muestra el gráfico de redes semánticas de la figura 5.3. De esta figura se identifican

Figura 5.2. *Nube de palabras de los reportes de sustentabilidad 2023 para Grupo México y Grupo Peñoles*

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.3. *Red semántica en los reportes de sustentabilidad 2023 para Grupo México y Grupo Peñoles*



Fuente: elaboración propia.

asociaciones entre términos, pero no hasta qué punto podrían dar paso a una práctica circular, para clarificar esto se hizo una revisión detallada de los reportes.

Reporte de sustentabilidad del Grupo México 2023

En materia de cambio climático, se incluye un programa de descarbonización a corto (2027), mediano (2035) y largo plazo (2050) con metas de reducción, alcance, acciones y escenarios; entre las futuras disposiciones a mediano plazo se consideran la electrificación de locomotoras internas y electromovilidad de transporte de carga. También se incluye un plan de descarbonización en su cadena de valor y participación en el sistema de comercio de emisiones de México. Al 2023 las emisiones GEI reportadas alcanzaron 8 105 kt CO_2eq., cifra que señaló a las operaciones mineras en México (en comparación con las llevadas a cabo en Perú y los EUA) como la principal fuente de emisiones (37.8%) GEI de la empresa. Las operaciones ferroviarias en México representan 15.6%, mientras que la División Infraestructura en México representan 12.4%. Como medida de reducción de emisiones se apostó por las reducciones de consumo de energía (combustibles y electricidad) que para la división de minería alcanzó 4.95% en comparación con el año 2022. Como medidas futuras de descarbonización, existen dos proyectos en la División Infraestructura: Parque Eólico El Retiro de 74 MW en Juchitán (La Ventosa), Parque Eólico Fenicias de 168 MW en General Bravo, Nuevo León y se reportó la operación de una Central de Ciclo Combinado en Nacozari, Sonora.

Se reportó la presencia de un Plan de Gestión Sustentable del Agua que no incluye una medida específica de reúso de agua tratada. En relación con la biodiversidad, la empresa tiene programas de biodiversidad y reforestación, en esta sección se informó la primera práctica circular, el desarrollo de tecnosuelos que faciliten las acciones de restauración ecológica en colaboración con la Facultad de Geología de la UNAM, otra medida fue la rehabilitación en zonas buffer en caminos e instalaciones, por ejemplo Planta de Ciclo Combinado "La Caridad", Nacozari, Sonora; Parque Eólico "El Retiro" Juchitán, Oaxaca; Parque Eólico "Fenicias" Nuevo León;

Sector Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche, y Ramal Puerto Interior, Guanajuato.

Con relación a la gestión de residuos mineros; durante 2023 en las diversas operaciones mineras en México se generaron 313 457 615 toneladas (t) de residuos mineros, de los cuales 0.24% (737 745 t) fueron escoria y otros residuos de fundición y refinería; 35% (109 919 007 t) fueron jales o relaves; y 65% (202 800 862 t) fueron residuos de roca o tepetate; de estos 182 956 514 t (90%) podrían generar drenaje ácido. La corporación informó sobre el destino de 134 817.1 toneladas de residuos (0.04% de lo generado), de los cuales 99% provino de la división de minera y 1% de la división de transporte; los residuos fueron clasificados como No peligrosos y Peligrosos; de los primeros 102 314.4 t (82.3%) se revaloraron para reciclaje; 79 228.9 t, si bien no se dieron detalles. Otra práctica circular —en evaluación al 2023— era el aprovechamiento de la escoria en la Metalúrgica de cobre en Sonora. Finalmente, la empresa reporta contar con un protocolo de cierre de operaciones con restauración de superficies y reforestación.

Reporte de sustentabilidad del Grupo Peñoles 2023

El manejo de agua incluyó la práctica circular del uso de agua tratada de origen municipal misma que cubrió el 26% del consumo de la empresa, dicho volumen se destinó a las minas Fresnillo plc en Zacatecas, específicamente en las unidades de Juanicipio con un volumen de 619 megalitros (Ml), Saucito con 310 Ml y Fresnillo con 2 413 Ml. También se reportó el consumo de agua municipal tratada en la unidad de fundición (1 147 Ml) y la planta electrolítica de zinc (1 700 Ml). Por otro lado, se reporta la existencia de un programa de biodiversidad que incluye evitar, restaurar y regenerar, sin embargo, no se ofrecen métricas ni ejemplos de su desempeño. Además, se informa de la presencia de un programa de cierre de operaciones y se ejemplifica con la restauración del distrito de Bismark en Ascensión, Chihuahua que después del cese de actividades, 61 ha habían sido reforestadas con 67 475 árboles nativos de la región.

Por su parte, la corporación declaró tener un sistema de manejo de residuos mineros mismos que ascendieron a 19.35 Millones de toneladas

(Mt) de jales, de los cuales 2.33 Mt fueron usados como relleno en obras inactivas al interior de la mina, mientras que el resto de las toneladas se almacenaron en los depósitos de jales. Además, se depositaron 23.01 Mt de mineral en patios de lixiviación y se generaron 1.21 Mt de otros residuos minero-metalúrgicos diferentes a los jales (jarosita) que fueron almacenados. Se reportó también la implementación de instrumentación y sistemas de monitoreo en los depósitos de jales de San Julián, Herradura, Sabinas, Tizapa y Capela. En el periodo se reportó que en la Minas Peñoles se reciclaron externamente 6 787.44 t, 91% (6 183.31 t) eran de manejo especial, el 9% (604.13 t) restante correspondió a residuos peligrosos.

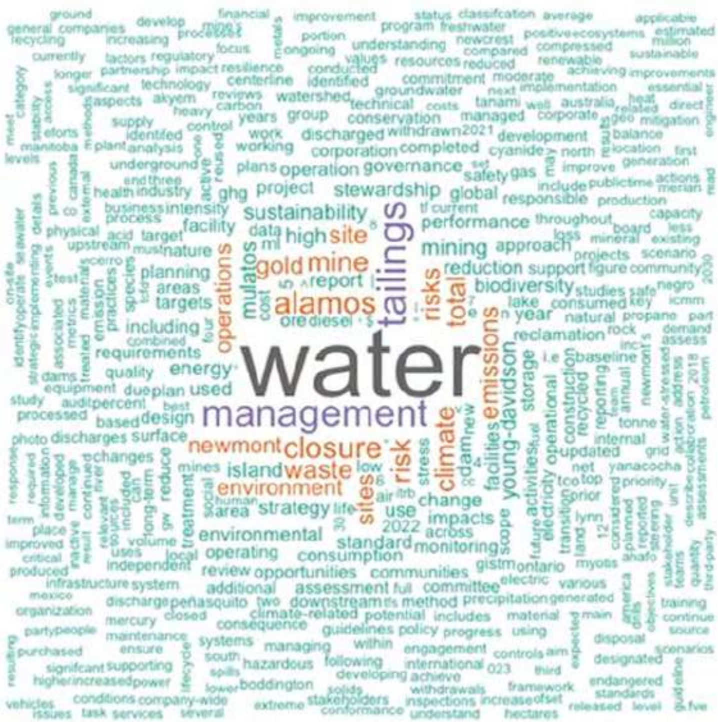
Análisis de contenido de los reportes de sustentabilidad de las empresas mineras extranjeras operando en México

El análisis de contenido en inglés de los reportes de sustentabilidad 2023 de Alamos Gold Inc. y Newmont mostró que el concepto de *Circular Economy* no es considerado; el término *circularity* aparece una vez en el reporte de Newmont y se le asoció con el reúso y reciclaje de materiales. Por otro lado, se buscaron en los textos la presencia de prácticas circulares usando N-gramas, tales como *deshidratation, Trunk electromobility* o *treated water reuse;* al final del ejercicio no se encontraron resultados para los bi-, tri- y cuatrigramas preparados. En la figura 5.4 se muestra la nube de palabras de ambos documentos; como puede notarse, el interés primordial de ambas compañías es el agua seguido por la gestión de relaves y el cierre de operaciones. Estos tres términos se relacionan como lo muestra el gráfico de redes semánticas de la figura 5.5. A fin de identificar prácticas circulares se procedió a la revisión detallada de los reportes.

Reporte de sustentabilidad de Alamos Gold Co. 2023

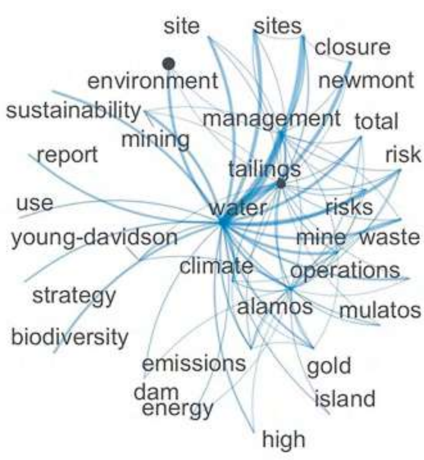
El distrito de los Mulatos en Sonora comprende el pozo los Mulatos, las minas La Yaqui Grande (LYG), Puerto del Aire y Carricito. Entre las medidas

Figura 5.4. *Nube de palabras de los reportes de sustentabilidad 2023 para Alamos Gold Inc. y Newmont*



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.5. *Red semántica en los reportes de sustentabilidad 2023 para Alamos Gold Inc. y Newmont*



Fuente: elaboración propia

relacionadas a eficiencia energética, en el distrito se informó de la instalaron de bombillas solares y LED en el campo minero y las oficinas de LYG se interconectó a la planta de generación de los Mulatos como mayor fuente de energía eléctrica lo que se tradujo en mejora eficiencia energética y el retiro de generadores en LYG. En relación con las medidas para la gestión de agua, se reportó la colección de agua pluvial, misma que consistió cerca de 43% del agua total para consumo, el resto fue de fuentes superficiales, y si bien se reporta que se tratan los efluentes hasta cumplir la normatividad nacional, no se reporta el reúso de agua. También se identificaron dos principales fuentes de emisiones GEI, una de ellas fue la generación de energía eléctrica en el distrito de los Mulatos, y la mitigación reportada fue el cierre de operaciones en el sitio.

Por otro lado, dentro de las actividades del manejo de residuos, se informó que se generaron 23 380 239 t de residuos, menos del 0.01% (2 186 t) fueron residuos no minerales de los cuales 52.3% fueron reciclados/reusados, pero no se dan detalles. La mayoría de los residuos fueron minerales (23 378 053 t) y no fueron ni reciclados ni reusados. En relación con medidas para preservar la biodiversidad, se desarrolló un proyecto de apicultura comunitaria con 12 apiarios y 50 colmenas, que persiguen incrementar la polinización en el sitio de los Mulatos y LYG. Por su parte, la compañía reportó el monitoreo de calidad del aire encontrándose que las emisiones de contaminantes criterio (NO_x, SOx, PM10, CO) en el distrito de operaciones mexicanos fue donde las concentraciones fueron más altas en comparación a las operaciones canadienses.

Reporte de sustentabilidad de Newmont 2023

La compañía reporta tener una estrategia energética y climática, aunque los miembros y asociados de Newmont (Cámara Minera de México, Cámara Canadiense, Cámara Estadounidense y Grupo Minero Zacatecano) en México no muestran una alineación política con los Acuerdos de París. Con todo, la empresa tiene un plan climático donde se detallan su gobernanza climática, la gestión de riesgos, estrategias, objetivos de reducción de emisiones GEIS e indicadores desempeño. Entre las áreas donde se planean im-

plementar para reducir emisiones GEI antes del 2050; entre los ejemplos se listan electromovilidad, cambio de fuentes fósiles a renovables, y neutralización ácida y de carbono. México es uno de los mayores emisores GEI —junto con Australia y Surinam— y se sigue un programa de reducción de emisiones. La estrategia de reducción será la implementación *in situ* de fuente de energía renovable (o la compra de energía limpia) en la mina polimetálica (5ta de plata) de Peñasquito en Zacatecas antes del 2030 (Newmont, 2022).

La gestión de agua en Peñasquito se reporta que el porcentaje de agua reciclado o reusada alcanza 66% del total de agua demandada, pero no se dan detalles aparte de la construcción de una planta de tratamiento en el sitio. Por su parte en la gestión de residuos mineros se reportó que de las 75 869 239 t de residuos de roca generados de los cales cerca de 16% (11 995 447 t) podrían generar drenaje ácido. Además de 764 t de residuos peligros fueron reusado *in situ* (444 t) o reciclados externamente (320 t). Por su parte, 3 499 t de residuos no peligrosos fueron reusados (118) en el sitio o reciclados fuera (3 381 t).

Conclusiones

El propósito primordial de este documento fue indagar sobre los avances de la adopción de prácticas circulares en la industria minera operando en México, para alcanzar este objetivo se realizó una revisión bibliográfica y se analizaron los reportes de sustentabilidad para 2023 de cuatro empresas mineras selectas; las dos empresas mexicanas más importantes: Grupo México y Grupo Peñoles; y dos compañías extranjeras: Alamos Gold Inc. y Newmont, de capital canadiense la primera y estadounidense la segunda. El primer ejercicio develó que el estudio fuera del sector es escaso, con baja coherencia y de minúsculo impacto en la industria minera.

Por otro lado, el segundo ejercicio mostró que las empresas mineras no consideran la importancia de adoptar estrategia de circularidad en sus prácticas, o al menos no las auto-reconocen como tales aunque pareciera que de facto las empresas están llevando a cabo praxis que bien podrían clasificarse como circulares, si hubiese mayor información podría aclarar-

se la confusión; por ejemplo el reúso de agua municipal tratada, no puede saberse como se cierra el ciclo del agua; esa misma situación se repite para el reúso y reciclaje de residuos mineros. A pesar de que las empresas mineras mexicanas tienen preocupaciones en la generación de emisiones GEI, no se reportan actividades concretas para la reducción de éstas. En tanto que las empresas extranjeras que operan en México tienen como mayor preocupación el acceso al agua, pero nuevamente no hay acciones precisas.

Las compañías mineras informan sobre su apego y respeto a estándares internacionales y normas nacionales en materia de calidad del agua y aire, lagunas de relaves, manejo de residuos mineros, biodiversidad y demás parámetros ambientales; empero en no pocas ocasiones tales parámetros son excedidos en el país, por ejemplo: México es un mayor emisor de contaminantes criterio atmosféricas de los proyectos mineros que la misma empresa opera en otros países. Las empresas también informan de sus planes para la gestión ambiental futura, pero al menos en este país las prácticas circulares reconocidas:

- Eficiencia del uso de recursos
- Economía circular
- Transición energética
- Calidad de vida e inclusión
- Trazabilidad, digitalización y transparencia

Estas prácticas son incipientemente ejercidas o las que parecen existir se aplican de manera aislada tal como deja entrever lo informado por las propias compañías.

Las empresas mineras cumplen —por lo documentado— con sus responsabilidades, pero parecen no estar abiertas a la innovación, y esto es aceptado con una mirada pasiva de los tres órdenes de gobierno. Parecería ser que el modelo extractivista utilizado para los combustibles fósiles como el petróleo podrían trasladarse a la explotación de minerales críticos para la transición energética demandada en un entorno de emergencia climática; empero bajo este mismo contexto surge una demanda creciente por parte de la sociedad —en particular las comunidades afectadas— a los gobiernos y empresas mineras de que cada vez menos se tolerarán a las

compañías mineras con prácticas depredadoras. Hay que reconocer que existen indicios de prácticas circulares, y un altísimo potencial de circularidad en el sector, aunque es tiempo de acelerar la implementación de éstas; ahora es el momento de actuar.

Referencias

Alanís Ortega, F. (2021, 12 de febrero). *Minería en México, pieza fundamental en la reactivación económica*. Cámara Minera de México. https://camimex.org.mx/application/files/9616/1315/1572/presentacioon120221.pdf

Alamos Gold. (2023). *Informe 2023*. https://esg2023.alamosgold.com/es/

Allwood, J. (2014). Squaring the circular economy: The role of recycling within a hierarchy of material management strategies. En E. Worrell y M. A. Reuter (Eds.), *Handbook of recycling.* Elsevier.

Antony Jose, S., Calhoun, J., Rentería, O. B., Mercado, P., Nakajima, S., Hope, C. N., Sotelo, M., Menezes, P. L. (2024). Promoting a circular economy in mining practices. *Sustainability, 16,* 11016. https://doi.org/10.3390/su162411016.

Azamar Alonso, A. y Téllez Ramírez, I. (2020). La gramática del río Sonora que exhibió el derrame de la mina de Cananea. *Argumentos, 33,* 217-238.

Bazúa-Rueda, E. R. et al. (2020). Mining, water and society: Recycling of mining effluents as a social solution to the use of water in Mexico. En E. Otazo-Sánchez, A. Navarro-Frómeta y V. Singh (Eds.), *Water availability and management in Mexico*. (Water Science and Technology Library, vol 88). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24962-5_19

Benoit et al. (2018). Quanteda: An R package for the quantitative analysis of textual data. *Journal of Open Source Software*, 3(30), 774. https://doi.org/10.21105/joss.00774

Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP). (2024). *Situación actual de la industria minera en México, 2020-2023* (CEFP/013/2024). Palacio Legislativo de San Lázaro, Ciudad de México. https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/documento/2024/cefp0132024.pdf

Center for Science in Public Participation (CSP2). (2025). *TSP Failures from 1915*. https://www.csp2.org/tsf-failures-from-1915

Gándara Martínez, E. (2023). *Economía circular en minería: Nanoparticulas en tecnologías de remediación del medio ambiente y microelectrónica a partir de residuos minerales y agrícolas* [Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Física]. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León.

García, F. F., Camilo Cotrim, C. F., Caramori, S. S. et al. (2024) Mine tailings dams' failures: Serious environmental impacts, remote solutions. *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04628-z

Gaytan-Alfaro, E. D. (2020). Efectos multisectoriales de la ausencia simulada de la acti-

vidad minera en México: Un análisis de impactos con un modelo de extracción hipotética. *Estudios Económicos Regionales y Sectoriales, 20*(1), 45-58.

Giménez, D. (2024). *R en el análisis literario en español.* https://www.rpubs.com/DiegoEGimenez/r_literatura_quanteda_es

Grupo México. (2023). *Informe de desarrollo sustentable 2023*. https://www.gmexico.com/GMDocs/InformeSustentable/Folletos/ESP/IDS23_ESP.pdf

Grupo Peñoles. (2023). *Informe de Sostenibilidad*. https://www.penoles.com.mx/IDS23/pdf/Penoles-informe-sosteniblidad-2023.pdf

International Energy Agency (IEA). (2024). *Global critical minerals outlook 2024*. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024

Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS). (2023). *Plataforma del mapa interactivo del IMSS*. https://public.tableau.com/app/profile/imss.cpe

Jaime, A. P. y Sanabria, J. (2021, 16-19 de marzo*). Resiliencia en actividades mineras*. XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica.

Lebre, E., Corder, G. y Golev, A. (2017). The role of the mining industry in a circular economy: A framework for resource management. *Journal of Industrial Ecology. 21*(3), 662-672. https://doi.org/10.1111/jiec.12596

Lucchini, F. L., Moreno, E. M., Pérez, V. P., Jofré, H. J., Olivares, G. O., Cattaneo, D. C., Barrios, J. B., Rubilar, J. P. R., Sepúlveda, A. S., Román, E. R. y Alvarez, R. A. (2021). *Minería verde: Oportunidades y desafíos.* Corporación Alta Ley. https://www.corporacionaltaley.cl/wp-content/uploads/2023/04/2021_Mineria-Verde_Oportunidades-y-Desafios.pdf

Mondragón de Jesús, E., Gómez Benítez, D. F., Ordaz Hernández, A. y Sánchez Carmona, F. (2024). Efectos multidimensionales de la minería en San José del Progreso, Oaxaca. *Acta Universitaria*, 34, 1-22, https://doi.org/10.15174/au.2024.4029

Newmont. (2023). *2023 sustainability report*. https://s24.q4cdn.com/382246808/files/doc_downloads/2023/sustainability/newmont-2023-Performance-Data.pdf

Nurmi, P. (2017). Green mining: A holistic concept for sustainable and acceptable mineral production. *Annals of Geophysics, 60.* https://doi.org/10.4401/ag-7420

Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL). (2025). *Base de datos versión 2.4.5*. https://www.ocmal.org

Onifade, M. et al. (2024). Advancing toward sustainability: The emergence of green mining technologies and practices. *Green and Smart Mining Engineering, 1,* 157-174. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.05.005

Puy-Alquiza, M. J. et al. (2024). Reuse of mine tailings as an alternative for the manufacture of refractory bricks: Sustainable remediation for mining waste management, *Remediation Journal, 35*(1), 70004. https://doi.org/10.1002/rem.70004

Real-Cornejo, A., Maldonado-Astudillo, R. I. y Plascencia, G. (2022). Minería a microescala para el desarrollo regional sostenible: Análisis exergético de un caso en Guerrero, México. *Revista de la Universidad del Zulia, 13*(37), 46-64. https://doi.org/10.46925/rdluz.37.04

Rivera Acosta, P. y Martínez Torres, R. E. (2021). Articulación de los Objetivos de Desa-

rrollo Sostenible con el paradigma de la economía circular. *Investigación y Desarrollo*, 29(1), 178-194. https://doi.org/10.14482/indes.29.1.333.7

Rojas-Hayes, C., Casas, J. E. y Sucre, C. G. (2023). *Green mining in Latin America and the Caribbean: comparative analysis of public policies and industry standards to promote sustainability in mining*. Inter-American Development Bank Technical Note, 2697.

Schröder, P., Albaladejo, M., Alonso Ribas, P., MacEwen, M. y Tilkanen, J. (2020). *The circular economy in Latin America and the Caribbean: Opportunities for building resilience* (Research paper). Energy, Environment and Resources Programme.

Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2024). *Anuario estadístico de la minería mexicana 2023*.

Téllez-Ramírez, I. y Sánchez-Salazar, M. T. (2024). Mining-metallurgical monopoly capital in Mexico, 1960-2023 (2024). *The Extractive Industries and Society, 20,* 101545, https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101545

Toscana-Aparicio, A. y Uribe-Sierra, S. E. (2024). Mining struggles in north-central Mexico: Between mining tradition, poverty, and environmentalism. *The Extractive Industries and Society*, 20, e101545. https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101548

Valenzuela, E. I., García-Figueroa, A. C., Amabilis-Sosa, L. E., Molina-Freane, F. E. y Pat-Espadas, A. M. (2020). Stabilization of potentially toxic elements contained in mine waste: A microbiological approach for the environmental management of mine tailings. *Journal of Environmental Management, 270,* 110873. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110873

Vargas, J. P., Muñoz Lagos, A. P., Feriz Torres, J. G., Kinney, I. S., Pérez Cortés, S. y Hurtado, J. P. (2022). Achieving circularity through novel product-service systems in the mining industry: An opportunity for circularity. *Sustainability, 14,* 3614. https://doi.org/10.3390/su14063614

Villa Gómez, D., Sánchez Salgado, E., Mejías, O., Pat-Espadas, A. M., Pinedo Torres, L. A., Jackson, L. y Parbhakar-Fox, A. (2022). Data integration of critical elements from mine waste in Mexico, Chile and Australia. *Minerals, 12*(2), 122, https://doi.org/10.3390/min12020122

Witker, J. (2023). Economic law, mining and the circular economy in Mexico. *Revista de la Facultad de Derecho de Mexico, 73*(286), 469-490. https://doi.org/10.22201/fder.24488933e.2023.286.86409

World Bank (2025). *Climate-smart mining initiative*. https://www.worldbank.org/en/programs/climate-smart-mining/csm-framework

6. De la extracción a la regeneración: La transformación innovadora y sostenible en la minería a través de la economía circular

Edgar Javier Méndez-Rosales[1]
Denise Margarita Rivera-Rivera[2]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.06

Resumen

La minería ha desempeñado un rol fundamental en el progreso económico y tecnológico a lo largo de la historia, impulsando la modernización y desarrollo en numerosos países. Sin embargo, su práctica convencional genera impactos ambientales considerables, como alteración de recursos hídricos, degradación del suelo y emisión de contaminantes que afectan la calidad del aire. Este escenario resalta la urgencia de adoptar un enfoque orientado a mitigar dichos efectos. Desde finales de los años 70, el paradigma de economía circular ha cuestionado los modelos lineales, que conciben los recursos naturales como simples insumos y los residuos como subproductos inevitables. En este contexto, la minería circular redefine los desechos como recursos valiosos, promoviendo el diseño de productos para su reutilización y reciclaje, y desvinculando el crecimiento económico del consumo intensivo. El presente capítulo tiene por objetivo examinar el estado actual de la minería circular mediante ejemplos de remediación de vertederos, reciclaje de metales y minerales, aprovechamiento de relaves, cierres regenerativos de minas, uso de energías renovables y diseño de productos reciclables. A través de una revisión de casos de éxito, tendencias emergentes, desafíos y direcciones futuras a nivel global y de la integración del análisis de marcos

[1] Maestro en Ciencias Administrativas en el Área Recursos Humanos. Docente de tiempo completo asociado A en la Universidad Autónoma de Nayarit, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2212-7542
[2] Doctora en Ciencias en Conservación del Patrimonio Paisajístico. ORCID https://orcid.org/0000-0003-0877-2390

normativos, esquemas de infraestructura y modelos de colaboración intersectorial, se identifican estrategias clave para superar barreras tecnológicas, operacionales y económicas.

Adoptar este enfoque maximizará la recuperación de materiales, aumentará la eficiencia en el uso de recursos y reducirá la huella ecológica del sector, promoviendo la regeneración de ecosistemas y el bienestar ambiental a largo plazo.

Palabras clave: *industria minera, impactos ambientales, economía circular, reciclaje, relaves, regeneración de minas.*

Introducción

La minería es la actividad industrial dedicada a la prospección, extracción y procesamiento de minerales. Desde el Paleolítico, el aprovechamiento de materiales como sílex y metales nativos permitió la confección de herramientas y construcciones rudimentarias. Con la Revolución Industrial, la explotación intensiva del hierro y carbón impulsó la producción de acero y el desarrollo de motores de combustión, detonando profundas transformaciones tecnológicas y socioeconómicas (Fodor, 2024). Hoy en día, la minería suministra insumos imprescindibles para infraestructura de vanguardia: semiconductores, baterías de iones de litio, turbinas eólicas y sistemas de transporte electrificado, manteniéndose como motor esencial del progreso técnico y de la mejora continua de la calidad de vida. Asimismo, genera empleo local y facilita la construcción de infraestructura básica como energía eléctrica y agua potable, cimentando el desarrollo de sectores tan diversos como el agroindustrial, el automotriz y el farmacéutico (Pons et al., 2021).

Como proveedor de materias primas, este sector minero también se refleja en las "rentas minerales" que muestran su aporte al PIB global. Según el Banco Mundial, las rentas minerales representaron en 2021 el 0.8% del PIB mundial, un indicador de la relevancia económica del subsector (World Bank, 2023). Para atender la creciente demanda de minerales críticos en energías renovables, baterías y electrónica avanzada, la Agencia In-

ternacional de la Energía estima que harán falta inversiones por 590 mil millones de USD en nuevos yacimientos hasta 2040 bajo el 'Escenario de Promesas Anunciadas' *(Announced Pledges Scenario-APS)* y hasta 800 mil millones USD en el 'Escenario de Cero Emisiones Netas para 2050' *(Net Zero Emissions by 2050 Scenario-NZE)* (IEA, 2024a). En México, la minería aporta cerca del 2.5% del PIB nacional, figura como tercera fuente de divisas, lidera la producción mundial de plata y se ubica entre los diez principales productores de dieciséis minerales estratégicos, incluyendo oro, cobre, zinc y molibdeno (Secretaría de Economía, 2024).

Pese a su relevancia económica y social, la minería ha sido objeto de críticas por sus impactos ambientales, entre los que destacan la degradación de paisajes, el consumo intensivo de agua y la generación de residuos. En 2018, se calculó que la extracción y procesamiento primario de minerales y metales fueron responsables del 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) asociados al sector energético (Azadi et al., 2020) y de aproximadamente el 7% de la deforestación mundial, situándose como la cuarta causa principal de pérdida de hábitat forestal y de su consiguiente impacto climático (World Bank, 2019). Gran parte de estos efectos se explica por la ausencia histórica de marcos regulatorios y tecnologías de mitigación capaces de proteger ecosistemas y comunidades locales (Lèbre et al., 2020). No obstante, ante la creciente presión social y la necesidad imperiosa de responder a los retos ambientales y sociales, la hipótesis central del presente trabajo sostiene que la adopción de prácticas de minería circular (que integren la reducción, reutilización, reciclaje y valorización de subproductos a lo largo de toda la cadena de valor) tiene el potencial de transformar los procesos mineros convencionales, minimizando sus impactos ambientales y, simultáneamente, generando beneficios socioeconómicos que impulsen un desarrollo verdaderamente sostenible.

El objetivo de este estudio es examinar el estado actual de la minería circular mediante ejemplos de remediación de vertederos, reciclaje de metales y minerales, aprovechamiento de relaves, cierres regenerativos de minas, uso de energías renovables y diseño de productos reciclables. Combina la revisión de casos de éxito, tendencias emergentes y direcciones futuras con un análisis de esquemas de infraestructura y modelos colaborativos. A partir de esta revisión, se han identificado tecnologías clave y agrupado

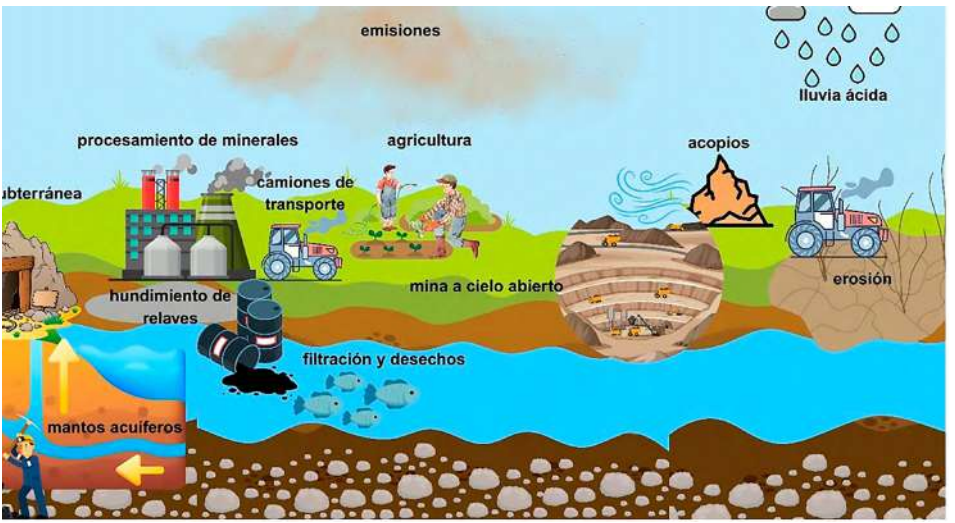
los principales retos técnicos, operativos y financieros junto a estrategias recomendadas para abordarlos.

Enmarcado en *Economía circular mexicana*, este capítulo aporta una perspectiva práctica y crítica que refuerza las rutas de acción para políticas públicas y prácticas empresariales centradas en el cierre de ciclos y la restauración ambiental.

Impactos generados por la minería

La industria minera es un sector con gran exposición pública debido a los impactos ambientales que genera en cada fase del ciclo extractivo y de procesamiento (Rodrigues y Mendes, 2018) (figura 6.1).

Figura 6.1. *Impactos ambientales generados por la minería*



Fuente: elaboración propia.

En términos hídricos, las operaciones mineras suelen requerir bombeo continuo para extraer agua de los tajos, lo que altera acuíferos y modifica la hidrología local; además, el contacto del agua con sulfuros expuestos da lugar al drenaje ácido de minas, cuyos efluentes de pH bajo y elevada carga de metales pesados contaminan ríos y mantos acuíferos, comprometiendo

la disponibilidad y calidad del agua para comunidades y ecosistemas aguas abajo (Ramana et al., 2025). En el suelo, los relaves y escombreras, cargados de residuos químicos y metales tóxicos, se infiltran en él, alteran su estructura y reducen su fertilidad, mientras que las fugas accidentales o la lixiviación al aire libre perpetúan la contaminación del terreno (Ali et al., 2021). Por su parte, la trituración, el transporte de rocas y las explosiones controladas generan nubes de polvo con partículas $PM_{2.5}$ y PM10 que deterioran la calidad del aire, mientras que las plantas de beneficio y fundiciones emiten gases como dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), contribuyendo a la formación de lluvia ácida y a afecciones respiratorias en las poblaciones cercanas (Moghimi Dehkordi et al., 2024). A escala paisajística, la remoción masiva de material, la deforestación y la fragmentación de hábitats provocan cambios irreversibles en el relieve, aumentando la erosión y la inestabilidad de suelos, y ocasionando pérdidas significativas de biodiversidad (Sonter et al., 2020).

Estos impactos ambientales se traducen en efectos sociales que han intensificado los conflictos en las zonas mineras. Las comunidades locales suelen asociar la minería con la contaminación de fuentes hídricas, emisiones tóxicas y problemas de salud, al tiempo que perciben una escasa generación de empleo estable y compensaciones insuficientes por los daños sufridos. Esta sensación de exclusión y falta de retribución ha dado lugar a protestas y bloqueos, pues los habitantes consideran que la actividad extractiva deteriora sus recursos y calidad de vida sin aportar un desarrollo local sostenible (Cotrina-Teatino y Marquina-Araujo, 2025).

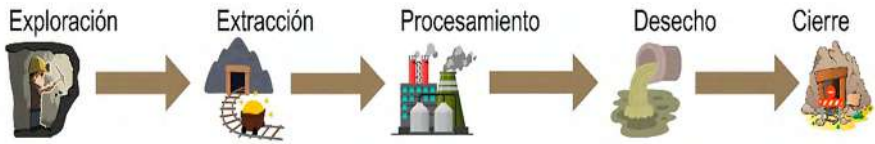
Frente a este panorama, la minería circular surge como un enfoque integral que no solo busca minimizar los impactos descritos, sino también transformar los pasivos ambientales en recursos valiosos para la regeneración de paisajes y ecosistemas. Al mismo tiempo, el fortalecimiento de los marcos normativos y la exigencia de planes de cierres y rehabilitación obligatorios están consolidando un nuevo estándar: ya no basta con extraer, sino que es imprescindible devolver al territorio condiciones que garanticen su sostenibilidad a largo plazo (Born, 2025a). En la siguiente sección se abordará las generalidades de este paradigma, sus principios operativos y cómo sienta las bases para casos de éxito en minería circular.

Generalidades de la minería circular

El concepto de *economía circular* surge como un paradigma capaz de reemplazar el modelo lineal basado en extraer-producir-desechar, por un sistema profundo y regenerativo que prioriza la eficiencia de materiales y la minimización de residuos de máximo nivel (De Jesus y Mendonça, 2018). Según la Comisión Europea (European Commission, 2020), la economía circular se define como un sistema económico de producción y consumo que amplía el horizonte del "fin de vida útil" de los productos, incentivando la reducción, la reutilización, el reciclaje y la recuperación de materiales en todas las etapas de los ciclos productivos y de consumo (Kirchherr y Van Santen, 2019). Su propósito central es cerrar dichos ciclos: mantener los productos y materiales en uso el mayor tiempo posible, regenerar los sistemas naturales y reducir drásticamente los flujos de desechos y contaminación, apoyándose en recursos renovables, mejores prácticas de diseño (ecodiseño) y una planificación transparente y resiliente (Botelho Junior et al., 2023). Originado conceptualmente en la década de 1960 y consolidado en las últimas décadas en países de Europa, Asia y América, este modelo ha demostrado su capacidad para impulsar la equidad social, la prosperidad económica y la calidad ambiental de manera simultánea (Liu et al., 2019).

Aplicado al sector minero, este mismo marco permite un contraste nítido con el modelo tradicional (figura 6.2), en el cual la extracción del mineral, su procesamiento y disposición de relaves generan elevados consumos de agua y energía, enormes volúmenes de residuos y pasivos ambientales difíciles de mitigar (Acordi et al., 2023; Oliveira et al., 2023). La minería circular propone, en cambio, replantear cada fase del proceso: desde el ecodiseño de las instalaciones para facilitar el desmontaje y reutilización de equipos, hasta la implantación de flotas optimizadas alimentadas con energías renovables que reduzcan pérdidas operativas (Vilaça et al., 2022). Mediante tecnologías de recuperación de metalúrgica avanzada y enfoques de simbiosis industrial, se valoriza el material residual, mientras que los ciclos de agua se cierran mediante tratamiento *in situ* y reúso continuo de efluentes. Estas prácticas no solo potencian la eficiencia en el uso de recursos, sino que también contribuyen de manera significativa a la miti-

Figura 6.2. *Flujo lineal de la minería tradicional*



Fuente: elaboración propia.

gación del cambio climático, al reducir emisiones y la huella hídrica del sector (ICMM, 2022). La figura 6.3 ilustra la transformación, oponiendo el flujo lineal convencional al ciclo regenerativo de la minería circular, en el que los pasivos ambientales se convierten en insumos valiosos para nuevas etapas de producción.

Figura 6.3. *Ciclo regenerativo de la minería circular*

Fuente: elaboración propia.

Existen diversas estrategias de economía circular en la minería que han demostrado reducir significativamente la huella ambiental, el consumo de materiales y los volúmenes de residuos (tabla 6.1). Entre ellas se encuentran la optimización del uso de agua dulce mediante circuitos hidráulicos cerrados y tecnologías de recirculación (Hamraoui et al., 2024; Jamett et al., 2022), la valorización de relaves como materias primas secundarias para otras industrias (Kinnunen et al., 2022) y la remanufactura de componentes de maquinaria pesada para prolongar su vida útil (Cister-

nas et al., 2022). Este impulso hacia modelos regenerativos no sólo está presente en la academia, donde el debate sobre la economía circular ha crecido exponencialmente en los últimos años (Kalmykova et al., 2018) sino también en el ámbito político y empresarial, donde cada vez más compañías exploran esquemas de negocio basados en la circularidad (Hernández-Chea et al., 2021).

Tabla 6.1. *Prácticas de minería circular: Mitigación de impactos ambientales y beneficios socioeconómicos*

Práctica circular	***Reducción de consumo de agua***	***Mejora de la calidad del suelo***	***Disminución de emisiones atmosféricas***	***Restauración paisajística***	***Beneficios socioeconómicos***
Circuitos hidráulicos cerrados	Evitan extracción externa y sobreexplotación de acuíferos				Reducción de costos en compra y tratamiento de agua: menor riesgo de conflictos por recurso hídrico
Valorización de relaves		Reduce depósitos de químicos en escombreras			Ingresos adicionales por venta de subproductos; diversificación de materias primas; generación de empleo en plantas de recuperación
Ecodiseño y remanufactura de maquinaria			Menor uso de combustibles fósiles al optimizar flotas y prolongar la vida útil de equipos		Ahorro en inversión de nuevos equipos; creación de empleos verdes en reparación y refabricación
Relleno de tajos con materiales inertes		Recupera relieve original y facilita revegetación		Favorece la recuperación del paisaje tras el cierre	Disminución de pasivos ambientales y de gastos futuros de remediación; potencial para desarrollo de usos recreativos o turísticos

Fuente: elaboración propia.

Los residuos mineros pueden provenir de insumos primarios (relaves, desechos de roca y escorias generados en la extracción y beneficio) y de insumos secundarios (maquinaria antigua, piezas, productos químicos,

aceites y lubricantes) que, al finalizar su vida útil, se convierten en desechos (Born, 2025). La recuperación de estos materiales se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12 (consumo y producción responsables) de la ONU, pues no solo disminuye la extracción de materias primas vírgenes, sino que a menudo mejora la eficiencia de los procesos metalúrgicos al reintroducir componentes valiosos en el circuito productivo (Arora et al., 2021). Incluso en sectores paralelos, como el manejo de residuos electrónicos, la recuperación avanzada de metales compite ya con la minería tradicional en términos de rendimiento y pureza (Zeng et al., 2018).

Una vez concluida la fase productiva, muchas minas quedan abandonadas con paisajes degradados y pasivos ambientales difíciles de restaurar. Para revertirlo, se han desarrollado estrategias que incluyen el relleno de tajos con materiales inertes, el tratamiento químico de efluentes (por ejemplo, neutralización de cianuros), el control de drenaje ácido, el confinamiento de residuos peligrosos y el uso de agentes biológicos para inmovilizar metales pesados. Estas prácticas, reflejo de la conciencia ambiental iniciada con el Informe Brundtland (1987) y del fortalecimiento normativo posterior, han desembocado en legislaciones que exigen planes de cierre y rehabilitación obligatorios. En muchos países desarrollados, ya es norma reconvertir sitios mineros para usos alternativos (como áreas recreativas o turísticas), pues la competitividad global incorpora cada vez más criterios de desempeño ambiental y social. La contribución sustancial de las prácticas de EC a la recuperación de estos sitios abandonados del sector minero hace hincapié en la utilización colaborativa de los recursos y las reformas de políticas como componentes esenciales (Okoye, 2025).

El manejo eficiente del agua es quizás la práctica más crítica en la minería circular. La adopción de circuitos hidráulicos completamente cerrados permite recircular el agua del proceso, supliendo únicamente las pérdidas por evaporación o las demandas de riego en viveros y uso domiciliario, mientras que la construcción de depósitos impermeables facilita la captura de agua de lluvia y su reinyección al sistema. Este diseño evita derrames accidentales hacia cauces superficiales o acuíferos, reduce la extracción de fuentes externas y garantiza un suministro estable para las operaciones y para la restauración postcierre. De este modo, la industria no solo minimiza su consumo de agua dulce, sino que se integra de manera

más armónica con los ciclos hidrológicos locales (Mishra et al., 2025). ¿Cómo se traducen en la práctica estos principios de economía circular dentro de la minería? En el siguiente apartado se exploran casos reales que ejemplifican estrategias innovadoras de minería circular.

Casos de aplicación de Minería Circular

En esta sección se analizan seis técnicas fundamentales de minería circular, cada una ilustrada con una tabla que resume sus resultados más relevantes: remediación de vertederos (tabla 6.2), reciclaje de metales y minerales (tabla 6.3), aprovechamiento de relaves (tabla 6.4), cierres regenerativos de minas (tabla 6.5), uso de energías renovables (tabla 6.6) y diseño de productos reciclables (tabla 6.7). Cada tabla sintetiza los datos clave para mostrar cómo estas iniciativas han logrado cerrar ciclos de materiales, reducir pasivos ambientales y generar valor local. Así, se muestra la evidencia práctica que respalda el potencial transformador de la minería circular en distintos contextos internacionales.

Remediación de vertederos

En Perú, el Ministerio de Energía y Minas identificó 8949 pasivos ambientales mineros (PAM), de los cuales cerca de 1200 ya están siendo remediados; en La Oroya, por ejemplo, se encapsularon relaves con alta concentración de plomo y arsénico bajo suelos tratados con enmiendas orgánicas, logrando una reducción del 60% de la biodisponibilidad de estos metales y ahorros en infraestructura pública de hasta 15 millones de USD al año gracias a la reutilización de esos mismos relaves (Quispe, 2024). En Chile, líder mundial de cobre, la estrategia de minería urbana prioriza depósitos de relaves (hoy más del 95% del mineral procesado) almacenándolas en presas cercanas y aprovechando su potencial futuro de recuperación, un enfoque que anticipa el aumento de la generación de relaves en 3.25 veces para 2035 y abre nuevas vías de valorización (Monardes y Sepúlveda, 2023). Por su parte, en Polonia la firma SRK S.A. ha convertido una antigua mina de carbón en un

centro de energía renovable: las aguas ácidas que antes representaban un pasivo se usan ahora en electrólisis para producir hidrógeno verde, cubriendo el 80% de la demanda energética del sitio y reduciendo las emisiones de CO_2 en 12 mil toneladas al año, un prototipo replicable en otras regiones carboníferas (Magdziarczyk et al., 2024) (tabla 6.2).

Tabla 6.2. *Remediación de vertederos*

Caso	*País*	*Enfoque principal*	*Tecnología/Método*	*Resultado cuantificable*	*Escalabilidad*
Gestión de PAM	Perú	Encapsulación de relaves con metales tóxicos	Cobertura con suelos tratados con enmiendas orgánicas	Reducción del 60% en biodisponibilidad de metales tóxicos	8,949 PAM identificados, 1,200 en remediación
Depósitos mineros	Chile	Caracterización de relaves	No especificado en detalle	Proyección de aumento 3.25 veces para 2035	Representa el 95% del mineral procesado
Transición en minas de carbón	Polonia	Reconversión a centro de energía renovable	Granjas fotovoltaicas y sistemas de hidrógeno	Reducción de 12,000 ton anuales de CO_2	Replicable en regiones carboníferas

Fuente: elaboración propia con información de Quispe (2024), Monardes y Sepúlveda (2023) y Magdziarczyk et al. (2024).

Reciclaje de minerales

En Chile, la División el Teniente de Codelco, la mayor mina subterránea de cobre del mundo creó en 2022 una unidad de economía circular enfocada en la simbiosis industrial; recicla acero, ropa usada y neumáticos provenientes de sus operaciones, cerrando el ciclo de materiales desde la extracción y minimizando la dependencia de recursos vírgenes. Finalmente, en esa misma región, la siderúrgica AZA aprovecha más de 600 000 toneladas anuales de chatarra ferrosa (bolas de molienda estructuras y maquinaria minera) para producir hasta 520 000 toneladas de acero, que retorna a la mina en forma de pernos y componentes, demostrando que el acero es 100% circular y reduciendo significativamente el consumo de agua, energía y emisiones de CO_2 (Soler Alvarado, 2024) (tabla 6.3).

Tabla 6.3. *Reciclaje de metales y minerales*

Caso	*País*	*Tipo de operación*	*Materiales reciclados*	*Sistema implementado*	*Logros destacados*
División El Teniente	Chile	Mina subterránea de cobre	Residuos industriales, acero, ropa, neumáticos	Unidad de economía circular	Valorización de residuos mediante simbiosis industrial
Acero vuelve al acero	Chile	Fabricación de acero	Chatarra ferrosa	Sistema eficiente de retiro y disposición	60 mil toneladas de chatarra recicladas

Fuente: elaboración propia con información de Soler Alvarado (2024).

Aprovechamiento de relaves

En Brasil, la Mina Morro Agudo (Nexa Resources) ha alcanzado la condición de "residuo cero" al transformar sus relaves polimetálicos (subproductos de la extracción de 17 300 toneladas de zinc y 4 700 toneladas de plomo en 2021) en Zincal 200, un enmiende para el control de la acidez de los suelos agrícolas locales que prolongan la vida fértil de la tierra y cierra el ciclo de materiales (Soler Alvarado, 2024). En la región andina de Perú, estudios técnicos confirmaron que los relaves cumplen con los estándares nacionales de resistencia y durabilidad para agregados de pavimento, permitiendo aprovechar hasta el 25% de los desechos mineros en la construcción de carreteras bajo un enfoque de economía circular (Torres Gonzales et al., 2024) (tabla 6.4).

Tabla 6.4. *Aprovechamiento de relaves*

Caso	*País*	*Recurso reutilizado*	*Aplicación*	*Beneficios principales*	*Innovación destacada*
Mina Morro Agudo	Brasil	Relaves mineros	Transformación en Zincal 200 para control de acidez en suelos	Operación "residuo cero"	Transformación completa de residuos en insumo agrícola
Región Andina del Perú	Perú	Relaves mineros	Agregado para construcción de carreteras	Aprovechamiento del 25% de relaves generados	Uso de relaves como material de construcción cumpliendo estándares

Fuente: elaboración propia con información de Soler Alvarado (2024) y Torres Gonzales et al. (2024).

Cierres regenerativos de minas

En Kenia, el Haller Park demuestra cómo un paisaje calizo devastado por casi dos décadas de extracción se convirtió en un ecosistema florido y rentable: mediante bioacondicionamiento de suelos, creación de humedales y reintroducción de fauna, este proyecto no sólo logró la supervivencia del 94% de las especies reimplantadas y la atracción de 181 000 visitantes anuales, sino que también generó ingresos turísticos equivalente al 7% del PIB local (Musando y Cáceres, 2023). En Australia Occidental, el plan de rehabilitación del Proyecto Beenup puso énfasis en la estabilización química de relaves ácidos y la cogestión con la comunidad Noongar, elevando el pH de 3 a más de 6.2 y reduciendo en un 89% la sedimentación en el río Blawood, al tiempo que sentó las bases para un fideicomiso indígena de turismo sostenible (Norrish et al., 2019). Por su parte, la reconversión de la mina a cielo abierto de As Pontes (España) combinó humedales pasivos, modelado de taludes y vigilancia ciudadana para neutralizar aguas ácidas (pH 2.8 → neutral), restablecer poblaciones de anguila europea y trucha, y generar 22 MW de energía hidroeléctrica reversible, siendo percibido por el 68% de los vecinos como motor de desarrollo local (Lopez, 2020) (tabla 6.5).

Tabla 6.5. *Cierres regenerativos de minas*

Caso	*País*	*Tipo de minería*	*Problema inicial*	*Solución implementada*	*Resultados clave*	*Característica distintiva*
Bamburi Haller Park	Kenia	Cantera de caliza	Paisaje devastado de 1,200 ha con suelos alcalinos	Proceso de regeneración en cuatro fases	29 especies de mamíferos reintroducidos, 181,000 visitantes anuales	Bioacondicionamiento con *Casuarina equisetifolia* y moluscos
Proyecto Beenup	Australia	Extracción de ilmenita	Área de 566 ha con lagunas ácidas	Plan de rehabilitación en tres etapas	pH elevado de 3 a 6.2-6.84, recolonización de 167 especies vegetales	Monitoreo comunitario mediante drones y sensores IoT
Lago As Pontes	España	Mina de carbón a cielo abierto	Hueco de 175 m de profundidad con agua acidificada	Humedales artificiales y participación ciudadana	Recuperación de especies indicadoras, 22 MW de energía	Co-diseño con comunidad para usos recreativos

Fuente: elaboración propia con información de Musando y Cáceres (2023), Norrish et al. (2019) y López, 2020.

Uso de energías renovables

En Chile, Codelco, Antofagasta Minerals y Collahuasi han apostado por la generación solar para descarbonizar sus operaciones a cielo abierto. Codelco lidera con la termosolar Pampa Elvira solar en Gabriela Mistral, que entrega 56 000 MWh térmicos anuales y cubre el 80% de la electroobtención, ahorrando 15 000 t CO_2 y limitando el uso de diésel al 20% por un investimento de 33 MUSD; además ha asegurado 375 GWh anuales de energía solar con baterías desde 2026 y 1.5 TWh renovables para 2026-2040, garantizando una matriz 100% limpia hacia 2030. Antofagasta Minerals y Collahuasi, por su parte, aprovechan la elevada radiación del desierto de Atacama para sus propios proyectos solares y de almacenamiento, reduciendo su huella de carbono y estabilizando costos energéticos. En Bolivia, la planta de concentrados de Pb-Ag-Zn implementa un modelo circular que comienza con la separación selectiva de desmontes según su riesgo de generar drenaje ácido, continúa con la desulfurización de relaves por espirales para producir un recubrimiento seco de cierre ambiental y culmina en la creación de un topsoil artificial (mezcla de ese recubrimiento con compost de residuos orgánicos y lodos de aguas tratadas), reutilizando finalmente el agua residual en la flotación y reduciendo tanto el consumo de agua dulce como los costos de cierre de minas (Solar Alvarado, 2024) (tabla 6.6).

Tabla 6.6. *Uso de energías renovables*

Caso	***País***	***Tipo de solución***	***Tecnología implementada***	***Capacidad/Generación***	***Beneficios medibles***
Codelco y otras	Chile	Energía solar	Planta termosolar Pampa Elvira (2,952 paneles)	56,000 MWh térmicos anuales	Reducción de 15,000 ton anuales CO2, 80% consumo cubierto
Producción minera en Bolivia	Bolivia	Sistema integral	Separación selectiva, desulfurización, *top soil* artificial	No especificada	Reducción de consumo de agua y energía, menor costo de cierre

Fuente: elaboración propia con información de Soler Alvarado (2024).

Diseño de productos reciclables

En Perú, un proyecto piloto en la región de Marañón demostró que los relaves auríferos pueden reemplazar el 70% de la arcilla en la fabricación de ladrillos estructurales, combinándose con 25% de cemento y 5% de silicato de sodio para producir piezas con resistencia a la compresión de 12.3 MPa (por encima del mínimo de 10 MPa de la norma NTP 399.6045) y concentraciones de arsénico lixiviado inferiores a 0.5 mg/L; este enfoque redujo los costos de producción en un 34% y recuperó 2.5 toneladas de oro residual anuales, mitigando al mismo tiempo el riesgo de drenaje ácido (Castromonte et al., 2024). En la provincia de Mpumalanga (Sudáfrica), investigadores convirtieron 50 millones de toneladas anuales de cenizas de carbón en geopolímeros mediante activación alcalina (8 M NaOH y silicato sódico) y curado a 75 °C durante 24 horas; el material alcanzó una resistencia a la flexión de 6.8 MPa, adecuada para la mampostería no estructural, con una huella de carbono de 0.23 kg CO_2/kg frente a 0.89 kg CO_2/kg del cemento Portland (Ekolu, 2022). De nuevo en Perú, se validó el uso de relaves cupríferos como sustituto del 25% de los áridos naturales en capas base de carreteras: tras trituración secundaria para ajustar la granulometría, los ensayos mostraron valores CBR de 98% y una estabilidad Marshall de 877 kg, superando los requisitos de tráfico medio; su aplicación a lo largo de 15 km de vías rurales permitió reducir en un 32% los costos materiales (Torres Gonzales et al., 2024) (tabla 6.7).

Tabla 6.7. *Diseño de productos reciclables*

Caso	*País*	*Material reutilizado*	*Producto desarrollado*	*Especificaciones técnicas*	*Ventaja económica*	*Impacto ambiental*
Ladrillos Estructurales	Perú	Relaves auríferos	Ladrillos (70% relaves, 25% cemento, 5% silicato)	Resistencia: 12.3 MPa	34% menos costo que ladrillos tradicionales	Recuperación de 2.5 ton de oro residual anual
Geopolímeros	Sudáfrica	Cenizas de carbón	Geopolímeros para construcción	Resistencia a flexión: 6.8 MPa	No especificada	Huella de carbono: 0.23 kgCO_2/kg *vs.* 0.89 del cemento Portland
Áridos para Carreteras	Perú	Relaves cupríferos	Sustituto de áridos naturales	CBR: 98%, Estabilidad Marshall: 877 kg	Reducción del 32% en costos de materiales	Aprovechamiento del 25% de relaves

Fuente: elaboración propia con datos de Castromonte et al. (2024), Ekolu (2022) y Torres Gonzales et al. (2024).

Desafíos y tendencias de la minería circular

A pesar de los avances en la implementación de la minería circular, persisten diversos desafíos que limitan su expansión. En el plano técnico, la variabilidad en la calidad de los relaves y la heterogeneidad de los minerales implican que muchas tecnologías de valorización o tratamiento (como la biolixiviación o la separación avanzada) no siempre alcancen rendimientos económicos o ambientales aceptables, mientras que los costos de inversión y operación de plantas de tratamiento pueden ser prohibitivos para proyectos de menor escala (Born, 2025). Desde la perspectiva económica, la viabilidad financiera de estas iniciativas depende de nuevos modelos de negocios circulares, por ejemplo minería como servicio o economías de plataforma orientadas a la simbiosis industrial, que aún están en fase experimental y requieren marcos de financiamiento e incentivos fiscales claros para escalar (Bianchi y Cordella, 2023). En el ámbito regulatorio y social, la ausencia de normativas específicas para esquemas circulares, los procesos de obtención de permisos y la resistencia o desconfianza de las comunidades locales frente a las innovaciones técnicas pueden demorar años la puesta en marcha de proyectos, como lo refleja la suspensión de grandes iniciativas mineras tras conflictos ambientales y sociales recientes (IEA, 2024; Watari et al., 2019).

A estos factores se suman retos de infraestructura y espacio. La eficacia de la economía circular depende de redes de transporte y sistemas de agua y energía diseñados para el intercambio de materiales y subproductos entre diferentes actores regionales; sin ello, los ciclos de retorno de insumos difícilmente se concretan (Henrysson y Nuur, 2021). Además, las normas culturales del sector, con su tradicional aversión al riesgo y enfoque en la eficiencia interna, y la dependencia de grandes multinacionales con proveedores exclusivos dificultan la colaboración intersectorial y la innovación local (Pietrobelli et al., 2018).En consecuencia, aunque la creciente presión por reducir la extracción primaria podría ser objetivo último de la economía circular, las actuales limitaciones de reservas, los ciclos de uso prolongados de muchos metales y las pérdidas inevitables en cada etapa de reciclaje aseguran que la minería primaria seguirá siendo indispensable en el futuro previsible (Charpentier Poncelet et al., 2022).

Frente a estos desafíos, emergen tendencias que prometen impulsar la transición circular en minería. La digitalización, con Internet de las Cosas (IoT), gemelos digitales y análisis avanzados, mejora el monitoreo de operaciones, optimiza la gestión de relaves y permite modelos predictivos de mantenimiento. La hidrometalurgia verde y la biolixiviación abren rutas más limpias para la recuperación de metales críticos, reduciendo el consumo de reactivos tóxicos. Finalmente, la economía de plataforma facilita la simbiosis industrial al conectar en tiempo real a generadores de subproductos con posibles usuarios, minimizando desechos y fomentando nuevos esquemas colaborativos. Estas innovaciones, junto con el fortalecimiento de políticas públicas y la formación de capital humano especializado, serán esenciales para superar las barreras técnicas, económicas y sociales de la minería circular (Watari y McLellan, 2024).

Conclusiones

La minería ha sido y sigue siendo un pilar fundamental del desarrollo económico y social en múltiples regiones del mundo, aportando materias primas esenciales y generando empleo e ingresos para comunidades enteras. Sin embargo, su impacto ambiental y social ha generado conflictos crecientes cuando no se atienden adecuadamente la degradación de paisajes, la contaminación de agua y suelos, y las tensiones con las poblaciones locales. Reconocer esta realidad y actuar sobre ella es ya una exigencia tanto legal como social.

En respuesta, la transición hacia modelos de minería circular y regenerativa aparece no sólo como una oportunidad, sino como una necesidad imperiosa. Al cerrar ciclos de materiales, mediante la reducción, reutilización, reciclaje y valorización de relaves, aguas y equipos, y al restaurar ecosistemas dañados, la industria puede minimizar sus impactos y, al mismo tiempo, reforzar su licencia social para operar. Para lograrlo, es imprescindible el desarrollo de nuevas tecnologías, el fortalecimiento de marcos normativos claros y colaborativos, y la formación de capital humano especializado. Sólo así la minería podrá integrarse en un modelo de coexistente armónica con el entorno natural, contribuyendo de manera sostenible al bienestar presente y futuro de las comunidades y del planeta.

Referencias

Acordi, J., Simão, L., Faraco, M. N. S., Borgert, C. H., Olivo, E., Montedo, O. R. K. y Raupp-Pereira, F. (2023). Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: A Brazilian case study based on environmental and physico-chemical features. *Resources Policy*, *80*, 103243. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103243

Ali, B., Loubna, B. y Leila, B. (2021). Impacts of mining activities on soil properties: case studies from Morocco mine sites. *Soil Science Annual*, *71*(4), 395-407. https://doi.org/10.37501/soilsa/133011

Arora, M., Raspall, F., Fearnley, L. y Silva, A. (2021). Urban mining in buildings for a circular economy: Planning, process and feasibility prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, *174*, 105754. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105754

Azadi, M., Northey, S. A., Ali, S. H. y Edraki, M. (2020). Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience*, *13*(2), 100-104. https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3

Bianchi, M. y Cordella, M. (2023). Does circular economy mitigate the extraction of natural resources? Empirical evidence based on analysis of 28 European economies over the past decade. *Ecological Economics*, *203*, 107607. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107607

Born, K. (2025). Adoption of circular economy practices in the mining sector: Evidence from Chile. *Resources Policy*, *102*, 105514. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105514

Botelho Junior, A. B., Martins, F. P., Cezarino, L. O., Liboni, L. B., Tenório, J. A. S. y Espinosa, D. C. R. (2023). The sustainable development goals, urban mining, and the circular economy. *The Extractive Industries and Society*, *16*, 101367. https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101367

Charpentier Poncelet, A., Helbig, C., Loubet, P., Beylot, A., Muller, S., Villeneuve, J., Laratte, B., Thorenz, A., Tuma, A. y Sonnemann, G. (2022). Losses and lifetimes of metals in the economy. *Nature Sustainability*, *5*(8), 717-726. https://doi.org/10.1038/s41893-022-00895-8

Cisternas, L. A., Ordóñez, J. I., Jeldres, R. I. y Serna-Guerrero, R. (2022). Toward the implementation of circular economy strategies: An overview of the current situation in mineral processing. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, *43*(6), 775-797. https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1946690

Cotrina-Teatino, M. A. y Marquina-Araujo, J. J. (2025). Circular economy in the mining industry: A bibliometric and systematic literature review. *Resources Policy*, *102*, 105513. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105513

De Jesus, A. y Mendonça, S. (2018). Lost in transition? Drivers and barriers in the eco-innovation road to the circular economy. *Ecological Economics*, *145*, 75-89. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.001

Ekolu, S. O. , S. F. , y N. A. (2022). Abandoned mine tailings and coal ash industrial

wastes for sustainable production of geopolymer brick masonry: South African case study. *Key Engineering Materials*, *916*.

European Commission. (2020). *Circular economy action plan*.

Fodor, D. (2024). *History of mining* (pp. 23-38). https://doi.org/10.1007/978-3-031-39393-8_3

Hamraoui, L., Bergani, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A., Neculita, C. M. y Benzaazoua, M. (2024). Towards a circular economy in the mining industry: Possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, *14*(3), 319. https://doi.org/10.3390/min14030319

Henrysson, M. y Nuur, C. (2021). The role of institutions in creating circular economy pathways for regional development. *The Journal of Environment & Development*, *30*(2), 149-171. https://doi.org/10.1177/1070496521991876

Hernández-Chea, R., Jain, A., Bocken, N. M. P. y Gurtoo, A. (2021). The business model in sustainability transitions: A conceptualization. *Sustainability*, *13*(11), 5763. https://doi.org/10.3390/su13115763

International Council on Mining and Metals (ICMM). (2022). *Position statement: Climate change*. https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/position-statements/climate-change

International Energy Agency (IEA). (2024). *Global critical minerals outlook 2024*. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024

Jamett, I., Santibánez González, E. D. R., Jiménez, Y. y Carrasco, P. (2022). Toward a circular economy in the copper mining industry. In *Handbook of smart materials, technologies, and devices* (pp. 1831-1851). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84205-5_59

Kalmykova, Y., Sadagopan, M. y Rosado, L. (2018). Circular economy: From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, *135*, 190-201. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034

Kinnunen, P., Karhu, M. yli-Rantala, E., Kivikytö-Reponen, P. y Mäkinen, J. (2022). A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*, *8*, 100499. https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499

Kirchherr, J. y Van Santen, R. (2019). Research on the circular economy: A critique of the field. *Resources, Conservation and Recycling*, *151*, 104480. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104480

Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J. R., Kemp, D., Côte, C., Arratia-Solar, A. y Valenta, R. K. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, *11*(1), 4823. https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9

Liu, X., Guo, P. y Guo, S. (2019). Assessing the eco-efficiency of a circular economy system in China's coal mining areas: Emergy and data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, *206*, 1101-1109. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.218

Lopez, X. P. S., B. M. L. (2020). Mine water and the environment. *Journal of the International Mine Water Association (IMWA)*.

Magdziarczyk, M., Chmiela, A., Su, W. y Smolinski, A. (2024). Green transformation of

mining towards energy self-sufficiency in a circular economy: A case study. *Energies*, *17*(15). https://doi.org/10.3390/en17153771

Mishra, P. P., Sravan, Ch. y Shivali, R. (2025). Circular economy in the Indian extractive industry: A preliminary analytical assessment of the major mining companies. *Cleaner Waste Systems*, *11*, 100287. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100287

Moghimi Dehkordi, M., Pournuroz Nodeh, Z., Soleimani Dehkordi, K., salmanvandi, H., Rasouli Khorjestan, R. y Ghaffarzadeh, M. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*, *23*, 102729. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102729

Monardes, V. y Sepúlveda, J. M. (2023). Multi-criteria analysis for circular economy promotion in the management of tailings dams: A case study. *Minerals*, *13*(4). https://doi.org/10.3390/min13040486

Musando, A. A. y Cáceres, F. (2023). Best practices in mine closure: A case study of cultural ecosystem services in the Kenyan mining sector. *The School of Public Policy Publications*, *16*(1). https://doi.org/10.55016/ojs/sppp.v16i1.75925

Norrish, R., Lyon, B., Russell, W. y Price, G. (2019). *Engaging stakeholders to achieve rehabilitation completion: A case study of the BHP Beenup Project*. 1423-1436. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_111_Norrish

Okoye, O. N. N. (2025). Circular economy in construction: Brownfield redevelopment of a mining site in Ebonyi State, Nigeria. En *Recent developments and innovations in the sustainable production of concrete* (pp. 461-500). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23895-6.00017-0

Oliveira, K. A., Simão, L., Rebouças, L. B., Hotza, D., Montedo, O. R. K., Novaes de Oliveira, A. P. y Raupp-Pereira, F. (2023). Ceramic shell waste valorization: A new approach to increase the sustainability of the precision casting industry from a circular economy perspective. *Waste Management*, *157*, 269-278. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.033

Pietrobelli, C., Marin, A. y Olivari, J. (2018). Innovation in mining value chains: New evidence from Latin America. *Resources Policy*, *58*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.010

Pons, A., Vintrò, C., Rius, J. y Vilaplana, J. (2021). Impact of corporate social responsibility in mining industries. *Resources Policy*, *72*, 102117. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102117

Quispe Quispe, A. (2024). Evolution in the management of mining environmental liabilities in Peru. *Arth Institute Journal*.

Ramana, K. V., Srinivas, T. y Rao, S. E. (2025). A study of environmental parameters influencing sustainable mining. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, *106*(1), 705-716. https://doi.org/10.1007/s40033-024-00842-1

Rodrigues, M. y Mendes, L. (2018). Mapping of the literature on social responsibility in the mining industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *181*, 88-101. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.163

Secretaría de Economía. (2024). *Minería*. https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria

Soler Alvarado, F. A. (2024). *Sostenibilidad y circularidad en la industria minera, de la teoría a la práctica*.

Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M. y Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, *11*(1), 4174. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5

Torres Gonzales, Y., Gonzales Cabrera, R., Cotera Nuñez, I. A. y Arana Ruedas, D. P. R. (2024). Valorización de residuos mineros como áridos para la construcción de carreteras: Economía circular en la región andina del Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, *26*(2), 71-78. https://doi.org/10.18271/ria.2024.605

Vilaça, A. S. I., Simão, L., Montedo, O. R. K., Novaes de Oliveira, A. P. y Raupp-Pereira, F. (2022). Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. *Resources Policy*, *75*, 102477. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102477

Watari, T. y McLellan, B. (2024). Global demand for green hydrogen-based steel: Insights from 28 scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, *79*, 630-635. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.423

Watari, T., Nansai, K., Nakajima, K., McLellan, B. C., Dominish, E. y Giurco, D. (2019). Integrating circular economy strategies with low-carbon scenarios: Lithium use in electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, *53*(20), 11657-11665. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02872

World Bank. (2019). *Forest-smart mining: Identifying factors associated with the impacts of large-scale mining on forests.*

World Bank. (2023). *Mineral rents*.

Zeng, X., Mathews, J. A. y Li, J. (2018). Urban mining of e-waste is becoming more cost-effective than virgin mining. *Environmental Science & Technology*, *52*(8), 4835-4841. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04909

7. *Opuntia* spp. como elemento articulador de la economía circular mexicana: Experiencias y posibilidades

Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez[1]
Carlos Alexander Lucho Constantino[2]
Rosa Icela Beltrán Hernández[3]
Claudia Coronel Olivares[4]
Juan Andrés Aguilar Huesca[5]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.07

Resumen

La capacidad de las plantas del género *Opuntia* para crecer en suelos empobrecidos y soportar sequías prolongadas las convierte en un recurso estratégico frente al cambio climático, en torno al cual pueden articularse esquemas de economía circular en México. Este trabajo presenta experiencias de investigación sobre el aprovechamiento de *Opuntia* spp. no comestibles o sus residuos para la producción de (i) un medio de cultivo para gránulos fúngicos, (ii) pectina y mucílago, (iii) películas comestibles y (iv) biofertilizante y biogás. Estas aplicaciones se desarrollaron bajo un enfoque de biorrefinería, con bajo impacto ambiental y sin competir con el uso alimentario tradicional de estas plantas. Los resultados respaldan el papel de *Opuntia* spp. como recurso clave para implementar modelos de economía circular en regiones áridas y semiáridas de México.

[1] Doctora en Microbiología-Biotecnología. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8351-8451
[2] Doctor en Biotecnología. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0899-2409
[3] Doctora en Biotecnología. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0678-6991
[4] Doctora en Territorio y Medio Ambiente. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9137-2894
[5] Doctorante en Ciencias Ambientales en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0921-1704

Palabras clave: *nopal, mucílago, pectina, biofertilizante, biogás.*

Introducción

Opuntia pertenece a las plantas con flores de la familia de las cactáceas *(Cactaceae),* que son endémicas del continente americano. Su distribución está documentada desde Canadá hasta la Patagonia, con un total de 2 000 especies (Stintzing y Carle, 2005). De las 200 especies existentes de nopales, en México se encuentran 102, de las cuales 94 pertenecen al género *Opuntia* y ocho al género *Nopalea* (Conabio, 2018; Madrigal-Santillán et al., 2022; Semarnat, 2020).

Desde la perspectiva económica destacan los cladodios comestibles de algunas especies de *Opuntia*, en particular de *O. ficus-indica*, comúnmente denominados nopal verdura. Las variedades de *O. ficus-indica* más utilizadas para la producción de nopal verdura son Copena V1, nopal de Castilla, Milpa Alta e Italiano. Asimismo, se ha registrado el aprovechamiento de *O. megacantha, O. xoconoxtle*, *O. leucotricha*, *O. chaveña, O. hyptiacantha* y *O. robusta*, esta última considerada silvestre (Ochoa y Barbera, 2018; Sáenz et al., 2013; Tahiri et al., 2025).

Se calcula que se cultivan cerca de 590 mil hectáreas de nopales en todo el mundo, pero el 90% de la producción mundial se origina en México. Esta producción se distribuye en varios estados, principalmente en zonas semiáridas con suelos pobres de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Baja California, Baja California Sur, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa, Jalisco, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Morelos, Estado de México y la Ciudad de México (Semarnat, 2020). El nopal verdura alcanza una producción nacional de 891 821 toneladas anuales, y se consume a razón de 6.2 kg per cápita y por año (SADER, 2020).

Tanto por su estructura, en la que abundan células mucilaginosas y fibra, como por el papel sociocultural que han jugado por siglos, los productos a base de opuntias abundan en el mercado mexicano. Así, productos que van desde agentes emulsificantes hasta coagulantes destinados al tratamiento del agua o reforzadores de materiales de construcción, son

muestra de la importancia de esta planta en la sociedad mexicana, ya de por sí considerable como alimento. En nuestro grupo de investigación, el Cuerpo Académico de Biotecnología y Microbiología Ambientales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH-CA-82), hemos explorado el potencial de *Opuntia* o sus residuos para elaborar diversos productos considerando aspectos clave para la sustentabilidad, tales como la no competencia con su consumo alimentario, el procesamiento en condiciones ambientales suaves o el aprovechamiento circular mediante el enfoque de las biorrefinerías.

Por consiguiente, en este capítulo se explora el potencial de *Opuntia* como eje articulador de esquemas de economía circular, especialmente en el contexto del cambio climático y la gestión sostenible de los recursos. Para ello, se presentan antecedentes acerca de la relevancia de esta cactácea en México, así como su distribución geográfica y principales características fisiológicas. Posteriormente, se discute el papel de la biotecnología y las biorrefinerías como herramientas clave para valorizar la biomasa de *Opuntia*. En la sección de resultados, se describen experiencias específicas desarrolladas por nuestro grupo de investigación en torno a (i) la formulación de medios para cultivo de gránulos fúngicos; (ii) la extracción de pectina y mucílago; (iii) la elaboración de películas comestibles, y (iv) la producción de biofertilizantes y biogás. Estas aplicaciones se integraron con un enfoque de biorrefinería, con bajo impacto ambiental y sin competir con su uso alimentario tradicional. Con este enfoque integral se busca demostrar que *Opuntia* puede incorporarse efectivamente en un modelo de economía circular sustentable.

Antecedentes

Importancia histórica del género *Opuntia*

Debido al consumo habitual de sus frutos maduros *(tun,* término que después se modificó a *tuna),* así como a otras usanzas que conferían a los nopales propiedades medicinales —para el tratamiento de fracturas óseas, como fuente de agua e incluso como cercas protectoras o de colindancias—,

la domesticación de *Opuntia* fue tan importante para los aztecas que incluso era evidente en sus insignias bélicas, que aparecía junto a un águila devorando una serpiente (Ochoa y Barbera, 2018). Así pues, los *nopalli* (planta de nopal en náhuatl) formaban parte de la cultura azteca, y continuaron siéndolo tras la llegada de los conquistadores españoles, que resultó en un intercambio significativo de flora y fauna entre el nuevo y el viejo mundo. La abundancia de esta planta en el paisaje fue destacada por Hernán Cortés y por los autores del Códice Barberini (1552), lo cual constituye la más antigua referencia a *Opuntia,* conocida como *tlatocnochtli*.

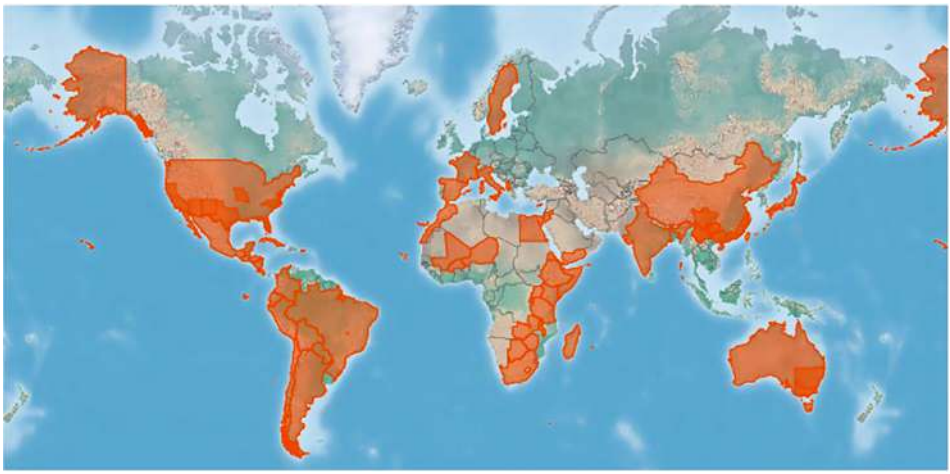
Los españoles quisieron imponer sus cultivos tradicionales y sólo se interesaron por aquellos productos americanos que generaran ganancias a corto plazo. Tal fue el caso de la grana cochinilla *nocheztli*, debido al colorante que se extrae de las hembras adultas del insecto hemíptero *Dactilopius coccus*, las cuales infestan los cladodios del nopal de Castilla (*O. ficus-indica*). Este colorante, rico en ácido el carmínico que le confiere el color rojo, fue apreciado y valuado incluso por encima de los metales preciosos (Coronado-Flores et al., 2015; Ochoa y Barbera, 2018).

Distribución y características del género *Opuntia*

De acuerdo con el Centro Internacional de Agricultura y Biociencias (CABI, por sus siglas en inglés), *Opuntia* se puede encontrar en regiones subtropicales, tropicales y de temperaturas cálidas del mundo; su base de datos CABI Compendio 37714 (Wallingford, Reino Unido) muestra un mapa de distribución actual alrededor del mundo *(vid.* figura 7.1) (Bakewell-Stone, 2022).

La versatilidad fisiológica de Opuntia le ha permitido expandirse por la cuenca mediterránea hasta el paralelo 43 norte, donde se cultiva principalmente en Túnez, Libia y Egipto (Prisa, 2021). Además, se ha propagado extensamente a Marruecos, Eritrea, Etiopía, Somalia, Yemen, así como al centro y sur de África; ha proliferado en el sur de Europa, Medio Oriente, la India, y se ha extendido a Australia y Hawaii (Bakewell-Stone, 2022; Zouitane et al., 2025).

Figura 7.1. *Mapa de distribución mundial contemporánea de Opuntia ficus-indica*



Fuente: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.37714#sec-10.

El rango de temperatura ideal para el crecimiento de *Opuntia* es de 10 a 15 °C en invierno y de 30 a 35 °C en verano; a temperaturas menores a −5 °C las hojas se tornan amarillas y por debajo de −16 °C los tejidos mueren. Toleran entre 100 y 400 mm de lluvia anual, crecen en suelos franco-arenosos y arcillo-limosos, con pH de 5-8 y conductividad eléctrica de 2-7 dS/m (Inglese et al., 2018; Jorge et al., 2025; Prisa, 2021). Como cualquier planta suculenta, es xerófita, perenne, con metabolismo ácido crasuláceo (CAM). Durante las noches sus raíces fibrosas, amplias y superficiales absorben el rocío que recubre el suelo y permiten que el agua se introduzca al tallo a través de un movimiento ascendente. Asimismo, se asocian con bacterias nitrificantes y micorrizas; además del nitrógeno asimilan fósforo, agua y nutrientes, lo que permite incluso una mejora en los suelos (Scheinvar, 2009).

La clasificación taxonómica del nopal de Castilla, según Bakewell-Stone (2022), es la siguiente: Dominio: *Eukaryota;* Reino: *Plantae; Phylum: Spermatophyta; Subphylum: Angiospermae;* Clase: *Dicotyledonae;* Orden: *Caryophyllales;* Familia: *Cactaceae;* Género: *Opuntia;* Especie: *ficus-indica.*

En México, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) describe al nopal de Castilla de la siguiente manera:

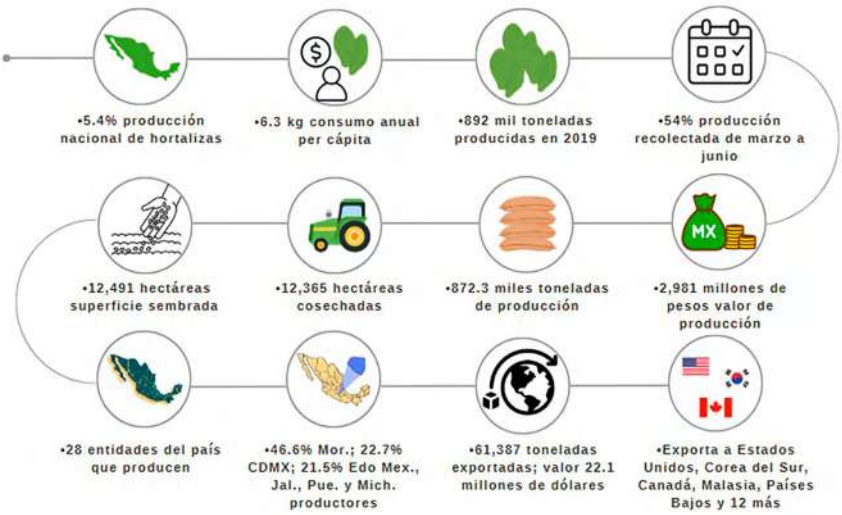
Opuntia ficus-indica (L.) Mill., 1768, también acepta como sinónimos a *Opuntia undulata*, *Cactus ficus-indica* u *Opuntia ficus-barbarica*. Es una

planta que se presenta como arbusto o arbórea, comúnmente con troncos bien desarrollados. Los tallos miden de 20 a 50 cm de largo por 20 a 30 cm de ancho, son de color verde opaco y están cubiertos por una capa cerosa. Los cladodios son verdes elípticos. Se caracteriza por carecer de espinas, pero cuando están presentes tienen entre 2 a 7, blanquecinas y no sobrepasan el centímetro de largo. Presenta flores de color amarillo, aunque en ocasiones de color naranja. Los frutos exhiben una variedad de colores desde rojizos a verdoso, pasando por el rosa, anaranjado o amarillo y raramente con espinas (Conabio, 2018).

El nopal verdura se ha convertido en un factor clave en la alimentación, salud y la calidad de vida de la sociedad mexicana debido a su alto contenido en nutrientes, minerales, fibra, vitaminas y compuestos bioactivos como ácidos orgánicos, carotenoides, compuestos volátiles, lípidos, betalaínas, compuestos polifenólicos y esteroles. Por ello, es una planta de gran importancia cultural y económica en el país; algunos datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023) que lo ejemplifican se presentan en la figura 7.2.

Además, podemos enlistar diversos estudios *in vivo*, *in vitro* y clínicos que le confieren a *Opuntia* propiedades como antioxidante, antiinflamato-

Figura 7.2. *Cifras oficiales hasta el año 2022 referentes al nopal verdura*

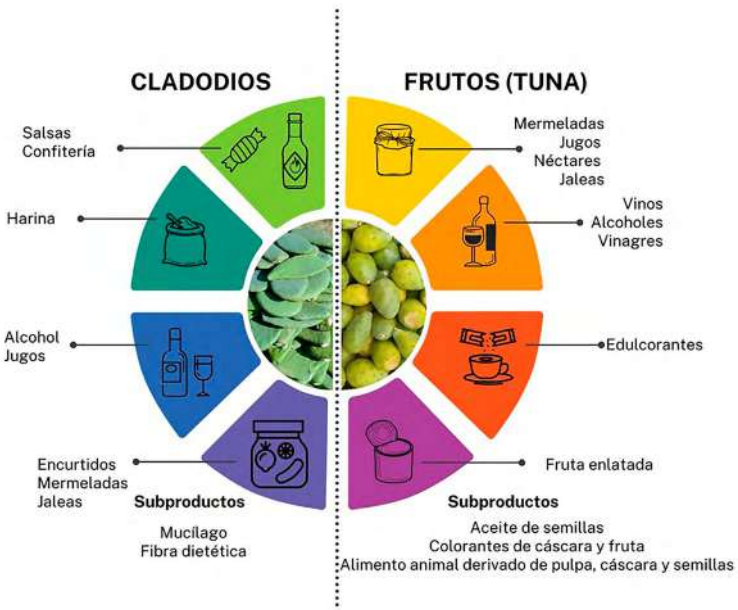


Fuente: elaboración propia con datos de SIAP (2023).

rio, antiulcerogénico, diurético, analgésico, antidiarréico, antibacteriano, antiviral, antihipercolesteronémico, antigenotóxico y antiproliferativo; útil en el manejo de hipoglucemia, heridas de la piel y obesidad; preventivo contra enfermedades cardiovasculares arteroescleróticas, fotoenvejecimiento o afectaciones en la infertilidad humana; en tratamientos de pérdida de peso y de salud ósea, y con capacidad quimiopreventiva, neuroprotectora, citotóxica y anticarcinogénica (Giraldo-Silva et al., 2023; Guedes et al., 2023; Ha et al., 2024; Kaur, 2012; Madrigal-Santillán et al., 2022; Monteiro et al., 2023; Silva et al., 2021; Shoukat et al., 2023). En consecuencia, se han formulado numerosos productos a base de *Opuntia*, principalmente de *O. ficus-indica*, para comercializar estos beneficios; algunos de ellos se presentan en la figura 7.3 (Giraldo-Silva et al., 2023; Ha et al., 2024; Mondragón y Chessa, 2018; Sáenz et al., 2013).

En contraparte, la producción y el manejo de los cultivos de nopal generan entre cuatro y ocho toneladas por hectárea al año de residuos orgánicos, los cuales suelen apilarse en el suelo sin ningún tratamiento y con-

Figura 7.3. *Productos y subproductos obtenidos de Opuntia ficus-indica*



Fuente: elaboración propia a partir de Madrigal-Santillán et al. (2022) y Giraldo-Silva et al. (2023).

tribuyen así a la producción de gases de efecto invernadero (Quintanar-Orozco, 2021). Se ha estimado que, si el cultivo de nopal se expandiera hacia suelos ociosos y con bajos niveles de fertilidad, esta generación de residuos alcanzaría los doce millones de toneladas anuales (Carrillo-Verástegui et al., 2024).

Economía circular de la biomasa a través de la biotecnología

Los principios de la economía circular pueden aplicarse exitosamente a los residuos agroindustriales, en particular a través de la biotecnología. Esta disciplina ofrece procesos sostenibles para recuperar nutrientes que de otro modo se perderían, mientras se mitiga la contaminación ambiental que representan. Además, los procesos basados en el cultivo de biomasa se consideran sostenibles porque se llevan a cabo a temperaturas y presiones cercanas a las ambientales, permiten obtener una alta selectividad de los productos y pueden ofrecer productos de alto valor agregado, entre otras ventajas. Por ejemplo, los procesos biotecnológicos pueden agregar valor a residuos tales como cáscaras, orujos y semillas generados en las industrias de frutas y verduras; lo anterior evita pérdidas nutricionales y económicas, ya que estos desechos son ricos en compuestos bioactivos valiosos tales como enzimas, aceites y vitaminas, entre otros. Estos compuestos bioactivos también se pueden integrar a medios para el cultivo de microorganismos; específicamente, la biotecnología fúngica permite utilizar como sustratos una amplia variedad de residuos agroindustriales en sustitución de azúcares refinados, lo que es aún más interesante puesto que este tipo de medios no compite con el consumo humano directo de alimentos.

Por otra parte, la digestión anaerobia de residuos orgánicos es una herramienta biotecnológica clave para la economía circular, ya que permite transformar residuos en recursos valiosos como biogás y fertilizantes naturales. Este proceso microbiano no solo reduce la disposición de residuos en vertederos o rellenos sanitarios, sino que también promueve la producción de energía renovable —y, por ende, la seguridad energética—, así como el cierre de ciclos de nutrientes.

Las biorrefinerías y la economía circular

Una biorrefinería se basa en el procesamiento sustentable de la biomasa para obtener un espectro amplio de productos comercializables y energía (Cervantes et al., 2020). Tomando como modelo las refinerías petrolíferas convencionales, el objetivo de una biorrefinería es el aprovechamiento óptimo de los componentes de la biomasa mediante un enfoque integrado; sin embargo, a diferencia de aquéllas, la materia prima de las biorrefinerías es muy variada, y busca que este procesamiento tenga la menor huella ambiental posible. Este modelo ha surgido como un enfoque sostenible y una plataforma prometedora para producir bienes a partir de cultivos comestibles (como la caña de azúcar), biomasa residual (residuos agrícolas o municipales), cultivos no comestibles o algas, a través de muy variadas tecnologías (térmicas, químicas o biotecnológicas). La capacidad de las biorrefinerías para generar múltiples productos, a partir de fuentes limitadas de materia prima permite cerrar ciclos materiales, lo que las posiciona como piezas clave dentro de las estrategias de la economía circular (Cervantes et al., 2020).

En los países del sur global, el concepto de biorrefinerías basadas en residuos resulta especialmente relevante, debido a la carga ambiental y económica que representa la disposición controlada de residuos, o la inexistencia de esta práctica. Además, estas biorrefinerías ofrecen una solución viable para satisfacer la creciente demanda energética, al tiempo que promueven la creación de nuevos negocios, mercados laborales, y mejoras en la salud pública y el entorno local.

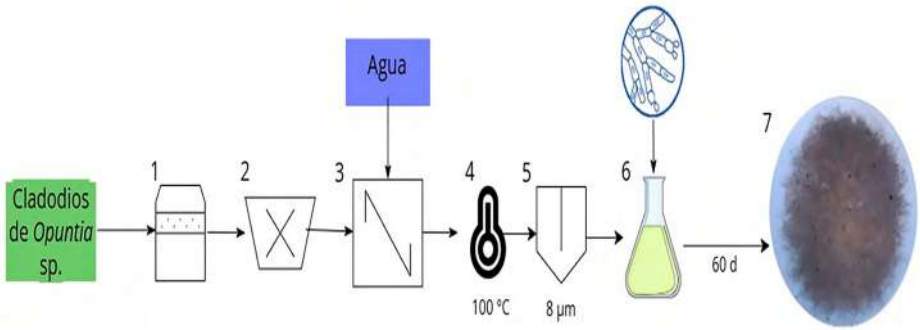
Resultados

Uso de harina de *Opuntia* para el cultivo de gránulos fúngicos

En medios líquidos, los hongos filamentosos pueden crecer como micelio disperso o en forma de gránulos. Estos últimos han sido objeto de numerosas investigaciones, ya que, gracias a su gran área superficial y a su potencial degradativo, tienen aplicaciones en procesos de tratamiento del agua

(Legorreta-Castañeda et al., 2020). Por ello, la formulación de nuevos medios de cultivo de bajo costo que cumplan con los requerimientos nutricionales para la granulación de hongos reviste un interés particular. Así, con harina de *O. heliabravoana,* preparada a partir de cladodios secos y triturados, se preparó una suspensión acuosa (3 g/L) que primero se mantuvo a 100 °C con agitación esporádica por tres minutos. Posteriormente, la suspensión se dejó reposar hasta que se formaron dos fases; la fase superior se hizo pasar a través de papel filtro (8 mm) y se utilizó como medio de cultivo para la granulación de una cepa fúngica modelo (*Aspergillus tabacinus*), como se muestra en la figura 7.4 (Legorreta-Castañeda, 2021).

Figura 7.4. *Descripción gráfica del cultivo de gránulos fúngicos a partir de harina de Opuntia heliabravoana. 1: Secado; 2: molienda; 3: mezcla; 4: calentamiento a 100 °C; 5: filtración; 6: inoculación; 7: cultivo de gránulos fúngicos*



Fuente: elaboración propia.

El medio de cultivo se caracterizó antes y tras la obtención de los gránulos fúngicos, lo cual ocurrió seis días después de la inoculación. Los parámetros medidos fueron materia orgánica, fosfatos totales y varios oligoelementos (magnesio, manganeso, sodio, potasio, hierro, cobre y zinc). Se comprobó que el medio de cultivo aportó cantidades suficientes de los nutrientes evaluados, ya que ninguno de ellos se consumió por completo (Legorreta-Castañeda, 2021).

La recuperación del valor nutricional de *O. heliabravoana* en este medio de cultivo permitió obtener gránulos fúngicos de *A. tabacinus,* que luego se emplearon eficientemente en procesos de biosorción de oro y plata presentes en bajas concentraciones (Legorreta-Castañeda et al., 2022).

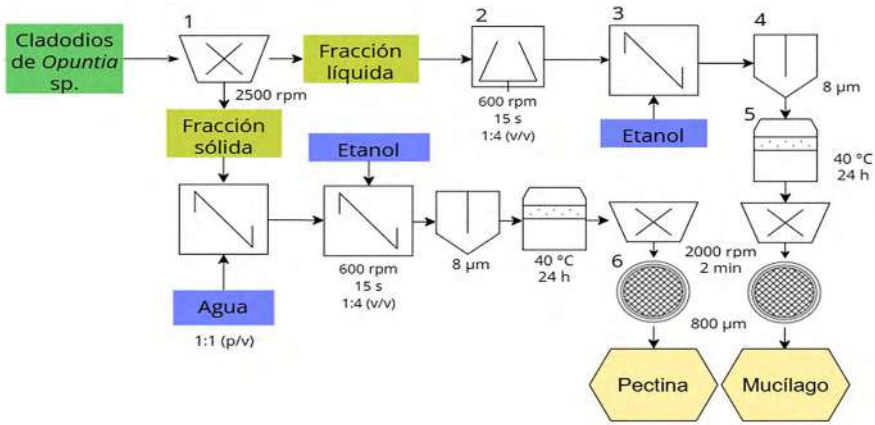
Este proceso, con aplicación prometedora en la remediación de efluentes de la minería, puede realizarse a partir de un medio de cultivo de bajo costo y que, por añadidura, no compite con el consumo humano de alimentos, ya que *O. heliabravoana* no es una especie comestible. Por ello, se solicitó la patente del procedimiento de preparación de este medio al Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (MX/A/2023/000485; Lucho-Constantino et al., 2023). Queda por investigar si otras especies de *Opuntia* producen medios de cultivo con valores nutrimentales semejantes, y confirmar si el medio de cultivo producido a partir de *O. heliabravoana* favorece la granulación de otras cepas fúngicas.

Extracción de pectina y mucílago

La pectina y el mucílago son hidrocoloides de alto peso molecular, cuya capacidad de retener agua posibilita la supervivencia de las especies de *Opuntia* en ambientes áridos y semiáridos; esta y otras características de ambos compuestos se aprovechan ampliamente en la industria. La pectina es una mezcla de ácidos poligalacturónicos coloidales, solubles en agua, que varían en su grado de neutralización y proporción de grupos éster metilo (Rodríguez et al., 2003). Por su parte, el mucílago es un polímero formado por azúcares como L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa, y también por ácido galacturónico (Luna-Zapién et al., 2023). Tanto la pectina como el mucílago se encuentran en las paredes celulares de los vegetales.

En la figura 7.5 se presenta el proceso de obtención de pectina y mucílago a partir de los cladodios de *Opuntia* sp.; durante la molienda se separan la fracción líquida y la sólida para extraer el mucílago y la pectina, respectivamente. La fracción líquida se homogeniza (600 rpm, 15 s) para disminuir su viscosidad y después se centrifuga (5000 rpm, 5 min); el sobrenadante se mezcla con etanol (1:4 v/v) agitando (600 rpm, 15 s), se deja reposar a temperatura ambiente (24 h, 20-25 °C) y luego se filtra (8 µm). Del líquido filtrado se recupera posteriormente el etanol por destilación, mientras que el sólido se seca (40 °C, 24 h), tritura y tamiza (800 µm) para homogenizar el tamaño de partícula del producto final, que es el mucílago.

Figura 7.5. *Proceso para la extracción de pectina y mucílago a partir de cladodios de Opuntia sp. 1: Molienda; 2: centrifugación; 3: mezcla; 4: filtración; 5: secado; 6: tamizado*



Fuente: elaboración propia.

Para la extracción de pectina, la fracción sólida que resulta de la molienda de los cladodios frescos se mezcla con agua (1:1 p/v) y después con etanol (1:4 v/v) agitando (600 rpm, 15 s), y finalmente se filtra (8 µm); el líquido filtrado se conserva para recuperar el etanol, y el sólido (la pectina) se seca (40 °C, 24 h), tritura y tamiza (800 µm). Vale la pena mencionar que el proceso anterior se encuentra protegido bajo el título de patente No. 421655 (Lucho-Constantino et al., 2019a).

La pectina obtenida presentó un grado de esterificación de 99.48%. El contenido de glucanos varió de 9.9 a 15.5%, el de xilanos de 7.4 a 13%, el de residuos insolubles de 3.6 a 4.1% y el de azúcares reductores fue de 32.2 g/L. De acuerdo con el análisis elemental, los contenidos de C, H, O y N fueron 30, 4.4, 0.63 y 64.8%, respectivamente, mientras que las proporciones de humedad, cenizas y proteína fueron 5.7, 28.1 y 73%, respectivamente. Estos resultados indicaron que la pectina tenía un alto grado de metoxilación, que le confiere la capacidad de formar geles cuando se mezcla con azúcares (sacarosa, fructosa, glucosa) en medio ácido, lo cual favorece su uso en la producción de alimentos ácidos y azucarados, como mermeladas, jugos y jarabes de cítricos, o conservas de mermeladas ácidas, entre otros. El recubrimiento de fármacos que desarrollan su actividad en

medios ácidos es otra aplicación de las pectinas con alto grado de metoxilación (Ciriminna et al., 2016; Qiu y Park, 2001).

El mucílago obtenido no presentó glucanos, pero sí xilanos (15.4-23.5%) y arabanos (0-13.4%); el contenido de humedad y de cenizas fueron 3.9 y 14.4%, respectivamente, y el de azúcares reductores, 29.6 g/L. Es común que los componentes del mucílago de opuntias varíen ampliamente no solo entre especies y con la edad de la planta, sino también por las características de los suelos y las condiciones climáticas (Stintzing y Carle, 2005), y a estos factores se le suman las condiciones del método de extracción. No obstante, los valores encontrados en este estudio se encuentran dentro de los intervalos reportados por Luna-Zapién et al. (2023). Según estos autores, entre las aplicaciones que se han probado experimentalmente para el mucílago de opuntias están las siguientes: estabilizante (en mayonesa, malvaviscos y huevo deshidratado), material de microencapsulación (de zeaxantina, antocianinas, betalaínas y pulpa de tuna amarilla-naranja), nutracéutico (en galletas y pan) y material de recubrimiento (nopal verdura, manzana, higo, moras, tomate y rebanadas de plátano deshidratadas).

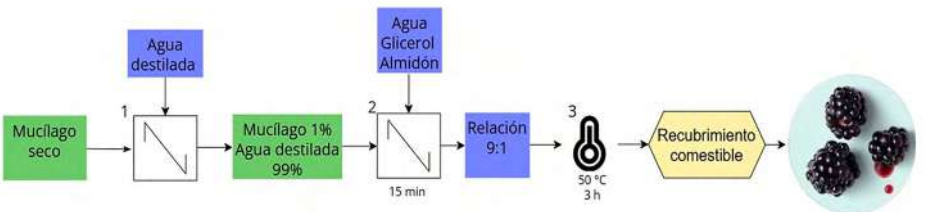
El método patentado por nuestro grupo de trabajo presenta ahorros significativos en recursos como agua, reactivos químicos, energía eléctrica y tiempo, que se traducen en un menor impacto ambiental. Por ejemplo, el pretratamiento de la biomasa consiste únicamente en una reducción de tamaño, a diferencia de otros métodos que usan grandes cantidades de agua, calientan o congelan los cladodios, o ajustan el pH del medio (Goyocolea y Cárdenas, 2003); también se han usado enzimas, agua en condiciones subcríticas, microondas y ultrasonido (Adetunji et al., 2017; Luna-Zapién et al., 2023). El etanol es el único reactivo empleado en nuestro proceso y se recupera por destilación para reutilizarse. También es importante resaltar que en nuestro caso los cladodios se aprovechan para obtener tanto pectina y mucílago. Si bien el rendimiento del mucílago es bajo (2.7% en base seca), el de la pectina es alto (53% en base seca) comparado con los rendimientos de 20-30% reportados a nivel industrial (Ciriminna et al., 2016).

Producción de películas comestibles

Las películas comestibles son materiales con los que se recubren alimentos para extender su vida útil, y que pueden ser ingeridos en conjunto con estos. Estas películas, al estar elaboradas a partir de materiales naturales y biodegradables, funcionan como barrera contra agentes externos, evitan que los alimentos pierdan componentes importantes (agua, gases o solutos) y representan una alternativa sustentable a los empaques plásticos convencionales. Así, en nuestro grupo de trabajo se elaboraron películas comestibles utilizando como materia prima el mucílago extraído de *O. heliabravoana* Scheinvar. Por una parte, se seleccionó esta especie forrajera de nopal con la intención de evitar la competencia con cultivos alimentarios; por la otra, se empleó un enfoque de biorrefinería, ya que se evaluó el potencial energético de los residuos generados en el proceso, para promover el aprovechamiento integral de la biomasa en las zonas en que ésta abunda.

Se partió de mucílago seco, preparado según lo expuesto en la sección anterior. Luego, se preparó una suspensión de mucílago al 1% con agua destilada, que se mezcló en una proporción 9:1 con almidón termoplástico, preparado con almidón, glicerol y agua (Nájera-García et al., 2018). Tras un calentamiento a 50 °C por tres horas y su posterior enfriamiento, se obtuvo una mezcla con la que se recubrieron zarzamoras frescas. El procedimiento se presenta en la figura 7.6. Tanto la materia prima como el producto se analizaron mediante distintos parámetros fisicoquímicos (pérdida de peso, pH, acidez titulable, sólidos solubles, color, crecimiento de levaduras y aceptación sensorial) durante su almacenamiento, lo que permitió su comparación.

Figura 7.6. *Preparación de películas comestibles a partir de mucílago de Opuntia heliabravoana Scheinvar. 1-2: Mezcla; 3: calentamiento a 50 °C por tres horas*



Fuente: elaboración propia.

Observamos que las películas comestibles contribuyeron significativamente a la preservación de las características organolépticas y fisicoquímicas del fruto, disminuyendo la pérdida de peso y el crecimiento microbiano; asimismo, mejoraron la apariencia y vida útil del producto (Nájera-García et al., 2018). Los residuos (sólidos y líquidos) generados en el proceso también se caracterizaron, y se determinó su potencial energético mediante la determinación de parámetros como la demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO_5), y su contenido de nutrientes. A partir de estos datos, se simuló su aprovechamiento en una planta de biodigestión anaerobia, lo que evidenció su factibilidad para la producción de biogás y fertilizantes orgánicos, cerrando así el ciclo de aprovechamiento integral bajo el concepto de biorrefinería. Pudimos corroborar que esta aplicación del mucílago de *Opuntia* promueve el uso de materiales renovables y locales, reduce la dependencia de plásticos derivados del petróleo para la conservación de alimentos, plantea un esquema viable de aprovechamiento de residuos, y contribuye a un modelo circular sustentable.

Producción de biofertilizante y biogás

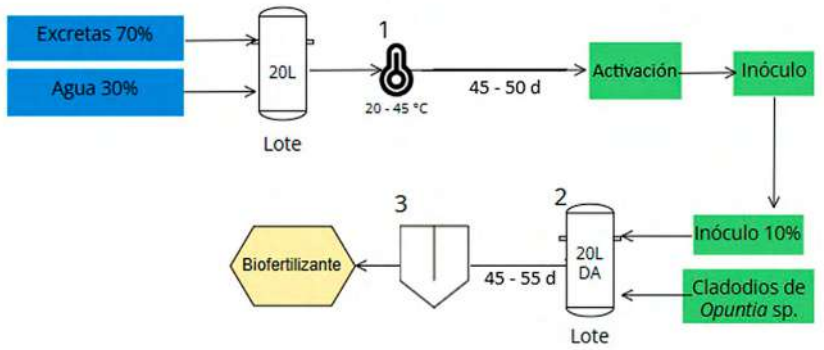
Los biofertilizantes son productos de origen biológico que aportan nutrientes o microorganismos benéficos para el crecimiento de los cultivos. Una de las principales características que tienen estos productos es la disponibilidad de los nutrientes en formas más asimilables para las plantas (Rodríguez-Martínez et al., 2022). El desarrollo tecnológico que se describe en esta sección es objeto de la patente MX 426410 B, y consiste en la producción de un biofertilizante producido a partir de *Opuntia* spp. mediante el proceso de digestión anaerobia (DA), en el cual la materia orgánica se degrada mediante la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. El resultado de esta degradación es un producto líquido que contiene nutrientes esenciales para los cultivos y puede aplicarse por vía foliar como bioestimulante o directamente en el suelo como mejorador (Lucho-Constantino et al., 2019b).

En este proceso se utilizaron como sustrato los residuos que resultaron de la poda de *Opuntia* spp.; para ello se seleccionaron cladodios con entre tres y 24 meses de edad. El pretratamiento de la biomasa solo consistió en

cortar los cladodios de un tamaño que permitiera alimentarlos a una trituradora, lo cual contrasta con la mayoría de los procesos reportados, que al pretratar térmica o enzimáticamente la biomasa, son más complejos y costosos. Este proceso se distingue en que no es necesario adicionar agua ni ajustar el pH del reactor con algún reactivo químico. El agua necesaria proviene de la humedad de los cladodios de *Opuntia* (85 al 95%), lo que es relevante en zonas áridas y semiáridas, y el pH del proceso se autorregula (6.5-8.0), gracias a lo cual el proceso es sencillo y de bajo costo.

En la figura 7.7 se describe el proceso de producción de biofertilizante de acuerdo con lo reportado en la patente MX 426410 B (Lucho-Constantino et al., 2019b). El primer paso es la activación del inóculo, para lo cual se alimenta el reactor con excretas animales frescas, preferentemente de conejos, que luego se cubren con agua. A la tapa del recipiente se le coloca un sistema *airlock* para impedir que el gas producido escape y que ingrese el aire atmosférico. El reactor debe mantenerse cerrado a una temperatura entre 20 y 45 °C durante un periodo de 45 a 50 días.

Figura 7.7. *Producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos de Opuntia spp. 1: Activación del inóculo; 2: alimentación del digestor; 3: separación y obtención del biofertilizante.*



Fuente: elaboración propia.

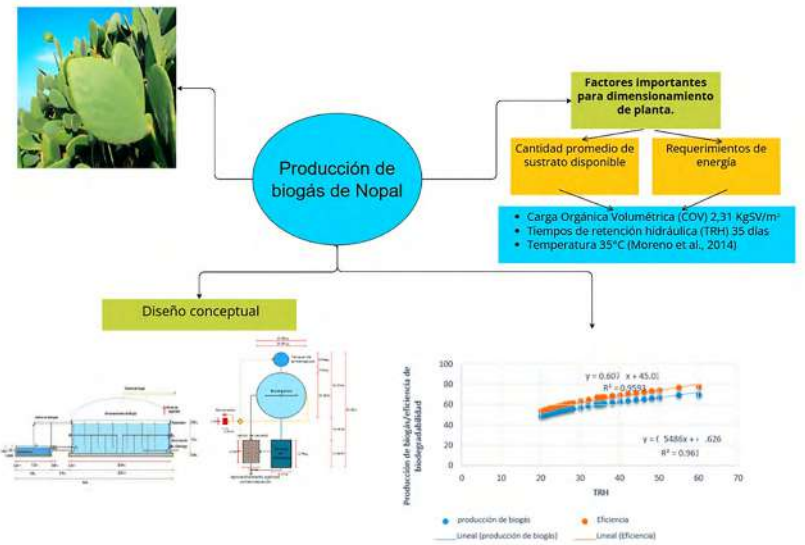
Posteriormente, para la producción de biofertilizante el reactor se alimenta con una mezcla de nopal triturado y el inóculo previamente preparado (a razón de entre 10 y 20% del volumen de la mezcla). El reactor se cierra herméticamente y en el tubo superior de salida se conecta una bolsa

en la que se almacenará el biogás producido durante el proceso de DA. El tiempo mínimo para la DA es de 45 a 55 días a una temperatura de 20 a 45 °C. Una vez finalizada la digestión, el biofertilizante líquido se separa de los sólidos que quedan en el fondo del reactor y se almacena en recipientes opacos a temperatura ambiente (entre 15 a 30 °C).

El biofertilizante producido a partir de *Opuntia* spp. contiene nutrientes fácilmente asimilables por las plantas, las cuales pueden aprovecharlos hasta en un 90%; este valor es muy superior al típico de un fertilizante químico (entre el 10 al 20% de los nutrientes aplicados). Asimismo, el pH ácido del biofertilizante contribuye a que los nutrientes se mantengan solubles y por lo tanto asimilables. Cabe mencionar que el biofertilizante tiene contenidos medios de nitrógeno total (0.7 g/L), altos contenidos de Ca, Mg, K (mayores de 1 g/L), así como de carbono orgánico total (3 g/L), lo que lo hace ideal como mejorador de suelo. Por añadidura, presenta una buena calidad microbiológica, por lo que su uso es seguro para cualquier cultivo y forma de aplicación (foliar o al suelo). EI biofertilizante obtenido promueve y estimula el crecimiento, la floración y el enraizamiento de los cultivos. En tomate verde (*Physalis ixocarpa*), el biofertilizante, combinado con biochar, permitió reducir a la mitad la cantidad de fertilizante químico empleado, adelantó la floración, incrementó significativamente la altura de las plantas y el peso de los frutos, además de favorecer un mayor desarrollo radicular. También se observaron mejoras en algunas propiedades del suelo como la densidad aparente, la capacidad de retención de agua, el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de fósforo, potasio, cobre, hierro y zinc. En el caso de la cebada, con la aplicación de biofertilizante al 15% incrementó la altura de la planta, el peso de la espiga, el número de grano y el rendimiento del cultivo.

Opuntia spp. es ideal para procesos de DA en medio líquido, ya que por sus contenidos de agua (85% al 95%) y materia seca (5-15%) permite generar un combustible gaseoso rico en metano o hidrógeno. En la figura 7.8 se muestra el diseño conceptual de una planta de digestión anaerobia que emplea residuos de nopal para generar 1 MWh/año con una eficiencia mayor al 78% en la producción de biogás con un contenido de 75% de metano (Quintanar-Orozco et al., 2016); igualmente, se muestran los factores a considerar en el dimensionamiento de la planta, que se realizó con el pro-

Figura 7.8. *Factores a considerar en el escalamiento de un proceso de producción de biogás usando residuos de nopal (1 MWH/año)*



Fuente: elaboración propia.

grama Biodigestor-Pro versión 3.5 (Grupo AquaLimpia Constructores, Alemania) (Moncayo, 2013).

Integrando experiencias y posibilidades sobre el uso de *Opuntia* como biomasa emergente bajo un esquema de biorrefinería

Opuntia spp. representa una fuente de biomasa altamente eficiente en el uso del agua, ideal para biorrefinerías en zonas áridas y semiáridas (Neupane et al., 2024; Niechayev et al., 2023). Es un cultivo adaptado a condiciones climáticas extremas, y su notable productividad anual —que puede alcanzar entre 3 y 50 Mg de materia seca por hectárea— así como su baja demanda hídrica, la convierten en una alternativa valiosa frente a cultivos C_3 o C_4 convencionales (Borland et al., 2009). Desde la perspectiva de una biorrefinería, como ya se destacó al inicio de este trabajo, *Opuntia* spp. ofrece numerosos productos que pueden ser aprovechables, a los que pueden agre-

garse compuestos bioactivos (betalaínas, antioxidantes), aceites de semillas con potencial nutracéutico y cosmético (Ciriminna et al., 2017), jugo de nopal cristalino con alto contenido de mucílago (Quintanar-Orozco y Lucho-Beltrán, 2023), entre muchos otros productos. Igualmente, su uso ha sido demostrado en la producción de bioenergía (biogás rico en metano o hidrógeno, bioetanol), biopolímeros y compuestos activos con actividad antimicrobiana e insecticida (Belay et al., 2021; Cenobio-Galindo et al., 2019; Quintanar-Orozco et al., 2018; Slot y Fort, 2024).

La implementación de una biorrefinería de *Opuntia* spp. es viable técnica, económica y ambientalmente: se han validado procesos escalables de extracción y transformación de cladodios y residuos para biogás —con rendimientos de hasta ~9720 m^3/ha·año—, y opciones de reciclaje del digestato como fertilizante orgánico (Quintanar-Orozco et al., 2018). Adicionalmente, *Opuntia* contribuye a la mitigación de gases de efecto invernadero a través del secuestro de carbono y la reducción de residuos orgánicos (Ciriminna et al., 2017; Cushman et al., 2015). Por tanto, resulta estratégico fomentar políticas públicas orientadas a instalar biorrefinerías basadas en esta biomasa local, promoviendo así economías circulares y resiliencia climática en regiones áridas de México.

Quintanar-Orozco (2021) propuso un modelo de biorrefinería basado en *O. heliabravoana* sustentado en datos experimentales generados a escala laboratorio, el cual fue escalado a nivel industrial mediante simulación de procesos. Esta propuesta contempla dos procesos eficientes para la obtención de cuatro productos de alto valor agregado como la pectina, mucílago, biofertilizante y biogás. El primer proceso se basa en la DA para la producción de biogás y biofertilizante (Quintanar-Orozco et al., 2018), mientras que el segundo consiste en una secuencia de operaciones unitarias mecánicas para la extracción de mucílago y pectina, empleando exclusivamente etanol grado alimenticio (96°) como solvente (Lucho-Constantino et al., 2019a; *vid.* la figura 7.5).

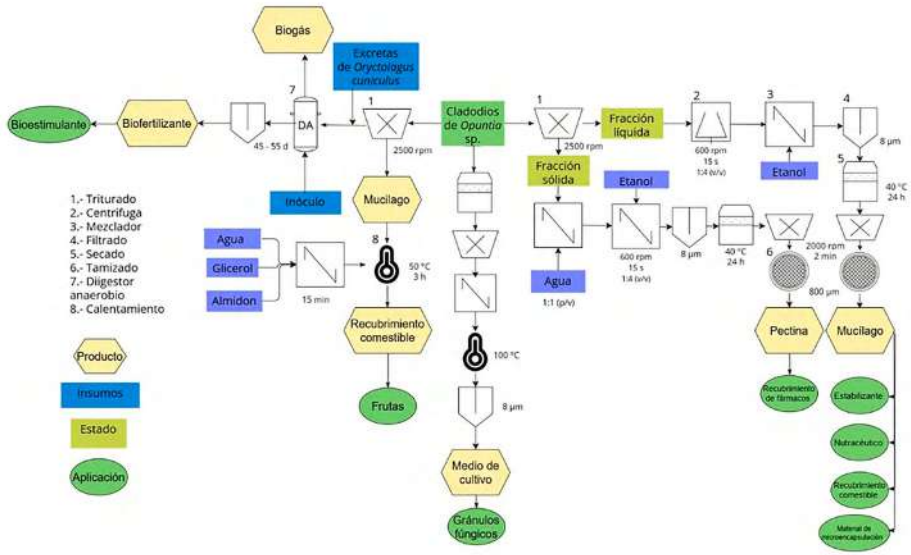
Para esta propuesta de biorrefinería se evaluaron aspectos tecnoeconómicos, energéticos y ambientales mediante el uso de herramientas como SimaPro y GREENSCOPE. Los resultados indicaron que el etanol constituye el insumo con mayor impacto ambiental, dada su utilización intensiva en los procesos de extracción de mucílago y pectina. Desde la

perspectiva de sostenibilidad, los indicadores evaluados mostraron un desempeño favorable en las áreas de eficiencia material, energética y ambiental. En cuanto al análisis económico, los indicadores oscilaron entre el 40% y el 90%, lo que sugiere oportunidades de optimización en los procesos. Asimismo, se estimó un tiempo de retorno de inversión de aproximadamente un año, lo cual respalda la viabilidad económica de esta biorrefinería para la producción y comercialización de los bioproductos propuestos (Quintanar-Orozco, 2021; Aguilar Huesca et al., 2022).

Por otra parte, en este trabajo se propone integrar a la biorrefinería de Quintanar-Orozco et al. (2021) el uso de la harina de *Opuntia* para la obtención de gránulos fúngicos *(vid.* figura 7.4; Lucho-Constantino et al., 2023), implementar el uso del mucílago de nopal para la elaboración de películas comestibles *(vid.* figura 7.6; Nájera-García et al., 2018), y un nuevo proceso para la producción de biogás y biofertilizante en reactores por lote (Lucho-Constantino et al., 2019b). En la figura 7.9 se muestra la nueva propuesta de biorrefinería de *Opuntia* spp., la cual integra los procesos mencionados y que fueron realizados por el Cuerpo Académico de Biotecnología y Microbiología Ambientales (UAEH-CA-82) con la finalidad de incrementar las opciones de productos que pueden producirse bajo un esquema de economía circular.

Sin embargo, es importante mencionar que los nuevos procesos integrados (elaboración de gránulos fúngicos, la utilización del mucílago para la elaboración de biopelículas comestibles y la producción de biogás y biofertilizante) aún deben ser evaluados en conjunto con la nueva biorrefinería de *Opuntia* spp. en aspectos tecno-económicos, energéticos y ambientales para determinar la factibilidad de su escalamiento a nivel industrial. Lo anterior representa una oportunidad para desarrollar una estrategia prometedora a nivel nacional y mundial para el aprovechamiento sostenible de este cultivo, contribuyendo a la valorización de sus bioproductos y a la promoción de una bioeconomía circular local en zonas áridas y semiáridas.

Figura 7.9. *Propuesta de biorrefinería de Opuntia spp. integrada a partir de los procesos realizados por el Cuerpo Académico de Biotecnología y Microbiología Ambiental (UAEH-CA-82)*



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones y perspectivas

Este trabajo posiciona a *Opuntia* spp. como una plataforma biotecnológica estratégica para zonas áridas y semiáridas por su abundancia, composición química y resistencia a la sequía, debido a lo cual representa una alternativa viable para articular esquemas de economía circular en México. A través del aprovechamiento de esta planta o sus residuos, se desarrollaron productos de valor agregado como medios de cultivo fúngico, pectina, mucílago, películas comestibles, biofertilizantes y biogás mediante procesos técnica y ambientalmente viables, lo que confirma su versatilidad como materia prima dentro del modelo de biorrefinería. En particular, se destaca el proceso desarrollado para obtener pectina y mucílago, ya que es competitivo en cuanto al rendimiento de pectina con respecto a otros procesos que usan *Opuntia* spp. e incluso con respecto a otros que emplean materias primas convencionales. Las experiencias de nuestro cuerpo académico, algunas de

las cuales han sido patentadas, además de evitar la competencia con su consumo alimentario, muestran un enfoque sustentable, con bajo requerimiento energético y alta eficiencia en la recuperación de recursos. Se puso en evidencia el potencial de estas aplicaciones para su implementación a escala real, la cual podría incorporar a otras opuntias no comestibles, tales como *O. albicarpa*, *O. hyptiacantha, O. megacantha* u *O. streptacantha*. Igualmente, propusimos una biorrefinería que integra estas experiencias, cuya factibilidad de escalamiento a nivel industrial aún debe demostrarse.

En perspectiva, los hallazgos de este estudio abren diversas líneas de acción estratégicas para consolidar y expandir el modelo de biorrefinerías basadas en *Opuntia* spp. Entre ellas, destaca la posibilidad de escalar y regionalizar esta tecnología hacia otras zonas áridas y semiáridas de México y, en general, del sur global, adaptándola a las particularidades ecológicas y socioeconómicas locales. Este esfuerzo debe ir acompañado del diseño e implementación de políticas públicas que fomenten incentivos gubernamentales y esquemas de financiamiento orientados a fortalecer estas iniciativas como parte de una agenda más amplia de resiliencia climática y desarrollo rural sustentable. Al mismo tiempo, resulta crucial continuar con la optimización de los procesos de extracción, especialmente aquellos que utilizan etanol, a fin de minimizar su huella ambiental. Asimismo, la diversificación de productos derivados —con aplicaciones potenciales en los sectores nutracéutico, cosmético y de biomateriales— representa una vía prometedora para incrementar la rentabilidad y competitividad del modelo. La articulación con cadenas de valor locales, mediante la incorporación de comunidades productoras, no solo fortalece las economías territoriales, sino que también impulsa modelos de negocio más inclusivos y justos. Finalmente, la consolidación de vínculos entre la academia, los centros de investigación y el sector productivo permitirá acelerar la transferencia tecnológica y la innovación aplicada. En conjunto, estas perspectivas respaldan la integración de *Opuntia* spp. en estrategias nacionales de adaptación al cambio climático y en la transición hacia una economía circular y resiliente.

Referencias

Adetunji, L. R., Adekuhle, A., Orsat, V. y Raghavan, V. (2017). Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review. *Food Hydrocoloids, 62*, 239-250. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015

Aguilar-Huesca, J. A., Quintanar-Orozco, E. T., Beltrán-Hernández, R. I. y Lucho-Constantino, C. A. (2022). Biorrefinería de *Opuntia* para obtener bioproductos y biocombustibles en zonas áridas y semiáridas: Estudios de caso. En *Convergencia de la ciencia: Una visión multidisciplinaria* (pp. 73-79). Colegio de Ciencias y Artes de Tabasco.

Bakewell-Stone, P. (2022). *Opuntia ficus-indica* (prickly pear) [Conjunto de datos]. *CABI Compendium*. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.37714

Belay, J. B., Habtu, N. G., Ancha, V. R. y Hussen, A. S. (2021). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of cladodes of cactus *(Opuntia ficus-indica)* for biogas production. *Heliyon, 7*(9), e08002. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08002

Borland, A. M., Griffiths, H., Hartwell, J. y Smith, J. A. C. (2009). Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. *Journal of Experimental Botany, 60*(10), 2879-2896. https://doi.org/10.1093/jxb/erp118

Carrillo-Verástegui, K. A., Poggi-Varaldo, H. M. y Escamilla-Alvarado, C. (2024). Transformando la industria del nopal: Biorrefinerías y el camino hacia la bioeconomía circular. *Revista CienciaUANL*, *27*(126), 46-53. https://doi.org/10.29105/cienciauanl27.126.6

Cenobio-Galindo, A. J., Pimentel-González, D. J., Del Razo-Rodríguez, O. E., Medina-Pérez, G., Carrillo-Inungaray, M. L., Reyes-Munguía, A. y Campos-Montiel, R. G. (2019). Antioxidant and antibacterial activities of a starch film with bioextracts microencapsulated from cactus fruits *(Opuntia oligacantha)*. *Food Science and Biotechnology, 28*(5), 1553-1561. https://doi.org/10.1007/s10068-019-00586-9

Cervantes, G., Torres, L. G. y Ortega, M. (2020). Valorization of agricultural wastes and biorefineries: A way of heading to circular economy. En R. Salomone, A. Cecchin, P. Deutz, A. Raggi y L. Cutaia (Eds.), *Industrial symbiosis for the circular economy: Strategies for sustainability* (pp. 181-194). Springer.

Ciriminna, R., Delisi, R., Albanese, L., Meneguzzo, F. y Pagliaro, M. (2017). *Opuntia ficus-indica* seed oil: Biorefinery and bioeconomy aspects. *European Journal of Lipid Science and Technology, 119*(8), 1700013. https://doi.org/10.1002/ejlt.201700013

Ciriminna, R., Fidalgo, A., Delisi, R., Ilharco, L. M. y Pagliaro, M. (2016). Pectin production and global market. *Agro Food Industry Hi-Tech, 27*(5), 17-20.

Conabio (2018). Nopal de castilla *(Opuntia ficus-indica)*. *EncicloVida*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. https://enciclovida.mx/especies/145108-opuntia-ficus-indica

Coronado-Flores, V., Tornero-Campante, M. A., Núñez-Tovar, R., Jaramillo-Villanueva, J. L. y De Jesús Méndez-Gallegos, S. (2015). Productividad de cochinilla *Dactylopius*

coccus (Hemiptera: Dactylopiidae) en cladodios de *Opuntia ficus-indica* (Cactacea) con diferentes tratamientos de fertilización. *Acta Zoológica Mexicana, 31*(2), 183-189. https://doi.org/10.21829/azm.2015.312539

Cushman, J. C., Davis, S. C., Yang, X. y Borland, A. M. (2015). Development and use of bioenergy feedstocks for semi-arid and arid lands. *Journal of Experimental Botany, 66*(14), 4177-4193. https://doi.org/10.1093/jxb/erv087

Giraldo-Silva, L., Ferreira, B., Rosa, E. y Dias, A. C. P. (2023). *Opuntia ficus-indica* fruit: A systematic review of its phytochemicals and pharmacological activities. *Plants*, *12*(3), 543. https://doi.org/10.3390/plants12030543

Goyocolea, F. M. y Cárdenas, A. (2003). Pectins from *Opuntia* spp: A short review. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, *5*, 17-29. https://doi.org/10.56890/jpacd.v5i.302

Guedes, B. N., Fathi, F., Silva, A. M., Santini, A., Oliveira, M. B. P. P. y Souto, E. B. (2023). Biopharmaceutical applications of *Opuntia ficus-indica*: Bibliometric map, bioactivities and extraction techniques. *European Food Research and Technology*, *249*(10), 2457-2469. https://doi.org/10.1007/s00217-023-04314-w

Ha, Q. T. T., Nguyen, K. K., Le, A. N., Vu, H. T. y Nguyen, T. N. (2024). *Opuntia ficus-indica* (L.): An overview of the recent application and opportunities in food. *Tropical Journal of Natural Product Research*, *8*(1). https://doi.org/10.26538/tjnpr/v8i1.3

Inglese, P., Liguori, G. y de la Barrera, E. (2018). Ecofisiología y biología reproductiva del nopal. En P. Inglese, C. Mondragón, A. Nefzaoui, C. Sáenz, M. Taguchi, H. Makkar, y M. Louhaichi (Eds.), *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (pp. 31-44). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Jorge, A. O. S., Costa, A. S. G., Ferreira, D. M. y Oliveira, M. B. P. P. (2025). Seasonal variation in nutritional and chemical profiles of wild *Opuntia ficus-indica* fruits. *Plants*, *14*(3), 409. https://doi.org/10.3390/plants14030409

Kaur, M. (2012). Pharmacological actions of *Opuntia ficus indica*: A review. *Journal of Applied Pharmaceutical Science, 2*(7), 15-18. https://doi.org/10.7324/japs.2012.2703

Legorreta-Castañeda, A. J., Lucho-Constantino, C. A., Coronel-Olivares, C., Beltrán-Hernández, R. I. y Vázquez-Rodríguez, G. A. (2022). Biosorption of precious metals present at dilute concentrations on fungal pellets. *Processes*, *10*(4), 645. https://doi.org/10.3390/pr10040645

Legorreta-Castañeda, A. J. (2021). *Biominería de Au y Ag por gránulos fúngicos en efluentes de la industria minera* [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Legorreta-Castañeda, A. J., Lucho-Constantino, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Coronel-Olivares, C. y Vázquez-Rodríguez, G. A. (2020). Biosorption of water pollutants by fungal pellets. *Water*, *12*(4), 1155. https://doi.org/10.3390/w12041155

Lucho-Constantino, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Coronel-Olivares, C., Vázquez-Rodríguez, G. A., Legorreta-Castañeda, A. J. y García-Reyes, M. (2023). *Medio de cultivo elaborado a partir de opuntia para obtener gránulos fúngicos*. Solicitud de Patente de México MX/a/2023/000485. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Lucho-Constantino, C. A., Beltrán-Hernández, R. I. y Quintanar Orozco, E. T. (2019a).

Proceso de extracción de pectina y mucílago a partir de cladodios de Opuntia *spp.* Patente de México MX 421655 B. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Lucho-Constantino, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Ortega-Ramírez E. y Cruz-Méndez A.S. (2019b). *Proceso para la producción de biofertilizante a partir de* Opuntia *spp.* Patente de México MX 426410 B. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Luna-Zapién, E. A., Zegbe, T. A., Meza-Velázquez, J. A. y Minjares-Fuentes, R. (2023). Mucílago de nopal *(Opuntia* spp.) y su aplicación como aditivo alimentario: Una visión general. *Revista de Fitotecnia Mexicana, 46*(1), 51-61. https://doi.org/10.35196/rfm.2023.1.51

Madrigal-Santillán, E., Portillo-Reyes, J., Madrigal-Bujaidar, E., Sánchez-Gutiérrez, M., Izquierdo-Vega, J. A., Izquierdo-Vega, J., Delgado-Olivares, L., Vargas-Mendoza, N., Álvarez-González, I., Morales-González, Á. y Morales-González, J. A. (2022). *Opuntia* spp. in human health: A comprehensive summary on its pharmacological, therapeutic and preventive properties. Part 2. *Plants*, *11*(18), 2333. https://doi.org/10.3390/plants11182333

Moncayo, R. G. (2013). *Biodigestores: dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. Aqualimpia Engineering e. K., pp. 86-112. https://www.aqualimpia.com/biodigestores/e-books-manuales/

Mondragón, C. y Chessa, I. (2018). Recursos genéticos de nopal. En P. Inglese, C. Mondragón, A. Nefzaoui, C. Sáenz, M. Taguchi, H. Makkar y M. Louhaichi (Eds.), *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (pp. 45-52). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Monteiro, S. S., Almeida, R. L., Santos, N. C., Pereira, E. M., Silva, A. P., Oliveira, H. M. L. y De Bittencourt-Pasquali, M. A. (2023). New functional foods with cactus components: Sustainable perspectives and future trends. *Foods*, *12*(13), 2494. https://doi.org/10.3390/foods12132494

Nájera-García, A. I., López-Hernández, R. E., Lucho-Constantino, C. A. y Vázquez-Rodríguez, G. A. (2018). Towards drylands biorefineries: Valorisation of forage *Opuntia* for the production of edible coatings. *Sustainability, 10*(6), 1878. https://doi.org/10.3390/su10061878

Neupane, D., Niechayev, N. A., Petrusa, L. M., Heinitz, C., Cushman, J. C. (2024). Biomass production of 14 accessions of cactus pear *(Opuntia* spp.) under semi-arid land conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *210*(3), e12704. https://doi.org/10.1111/jac.12705

Niechayev, N. A., Mayer, J. A. y Cushman, J. C. (2023). Developmental dynamics of crassulacean acid metabolism (CAM) in *Opuntia ficus-indica*. *Annals of Botany, 132*(4), 869-879. https://doi.org/10.1093/aob/mcad070

Ochoa, M. J. y Barbera, G. (2018). Historia e importancia agroecológica y económica. En P. Inglese, C. Mondragón, A. Nefzaoui, C. Sáenz, M. Taguchi, H. Makkar y M. Louhaichi (Eds.), *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (pp. 1-11). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Prisa, N. D. (2021). *Opuntia ficus-indica* the key plant in climate change: Characteristics,

cultivation and uses. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, *17*(2), 94-105. https://doi.org/10.30574/gscbps.2021.17.2.0333

Qiu, Y. y Park, K. (2001). Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, *53*, 321-339.

Quintanar-Orozco, E. T. y Lucho-Beltrán, I. (2023). *Proceso para la obtención de jugo de nopal cristalino con alto contenido de mucílago.* Solicitud de patente de México MX/a/2023/012014. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Quintanar-Orozco, E. T. (2021). *Valoración de residuos de Opuntia spp. mediante un esquema de biorrefinería* [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Quintanar-Orozco, E. T., Vázquez-Rodríguez, G. A., Beltrán-Hernández, R. I., Lucho-Constantino, C. A., Coronel-Olivares, C., Montiel, S. G. e Islas-Valdez, S. (2018). Enhancement of the biogas and biofertilizer production from *Opuntia heliabravoana* Scheinvar. *Environmental Science and Pollution Research, 25*, 28403-28412.

Quintanar-Orozco, E. T., Augspach, C., Beltrán-Hernández, R. I., Jaimes-Núñez, E. I., Vázquez-Rodríguez, G. A., Cornejo-Oviedo, F. M., Coronel-Olivares, C., Lucho-Constantino, C. A. (2016). Diseño conceptual de una planta de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos de nopal. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, *3*(6). https://doi.org/10.29057/icbi.v3i6.578

Rodríguez, S. E., Sandoval, A. E. y Ayala, A. A. (2003). Hidrocoloides naturales de origen vegetal. Investigaciones recientes y aplicaciones en la industria de alimentos. *Tecnura*, *13*, 4-13.

Rodríguez-Martínez, D. A., Lucho-Constantino, C. A., Martínez-Ortiz, J. A., Sánchez-Contreras, M. I., López-Pérez, P. A. y Beltrán-Hernández, R. I. (2022). El biochar y los biofertilizantes como tecnologías emergentes agroecológicas. En *Convergencia de la ciencia: una visión multidisciplinaria* (pp. 65-72). Colegio de Ciencias y Artes de Tabasco.

Sáenz, C., Berger, H., Rodríguez-Félix, A., Galletti, L., Corrales García, J., Sepúlveda, E., Varnero, M. T., García de Cortázar, V., Cuevas-García, R., Arias, E., Mondragón, C., Higuera, I. y Rosell, C. (2013). *Agro-industrial utilization of cactus pear*. Food and Agriculture Organization.

Scheinvar, L. (2009). Subfamilia Opuntioideae (Cactaceae). En A. Lot y Z. Cano-Santana (Eds.), *Biodiversidad del Pedregal de San Ángel* (pp. 143-152). Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel / UNAM, Coordinación de la Investigación Científica.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2020). *El nopal, parte de la riqueza del campo mexicano.* https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-mexicano

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2020). *La riqueza del nopal*. https://www.gob.mx/semarnat/articulos/la-riqueza-del-nopal?idiom=es

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). *¡Y el nopal ingresó en la dieta simbólica y real de los mexicanos!* https://www.gob.mx/siap/articulos/y-el-nopal-ingreso-en-la-dieta-simbolica-y-real-de-los-mexicanos

Shoukat, R., Cappai, M., Pia, G. y Pilia, L. (2023). An updated review: *Opuntia ficus indica*

(OFI) chemistry and its diverse applications. *Applied Sciences*, *13*(13), 7724. https://doi.org/10.3390/app13137724

Silva, M. A., Albuquerque, T. G., Pereira, P., Ramalho, R., Vicente, F., Oliveira, M. B. P. P. y Costa, H. S. (2021). *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: A multi-benefit potential to be exploited. *Molecules*, *26*(4), 951. https://doi.org/10.3390/molecules26040951

Slot, L. E. y Fort, F. (2024). Drivers of adoption of sustainable prickly pear *(Opuntia ficus-indica)* innovations and conservation agriculture by smallholder farmers in Morocco. *Agronomy, 14*(12), 3014. https://doi.org/10.3390/agronomy14123014

Stintzing, F. C. y Carle, R. (2005). Cactus stems *(Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition & Food Research*, *49*(2), 175-194. https://doi.org/10.1002/mnfr.200400071

Tahiri, A., Aabd, N. A., Qessaoui, R., Mimouni, A. y Bouharroud, R. (2025). Genetic diversity and breeding of cactus *(Opuntia* spp.). En J. M. Al-Khayri, S. M. Jain y M. A. Wani (Eds.), *Breeding of ornamental crops: Potted plants and shrubs* (Advances in Plant Breeding Strategies, vol. 7; pp. 153-193). Springer.

Zouitane, I., Ferioun, M., Bouamri, K., Derraz, K., Koraichi, S. I., Idbella, M., Lingua, G. y Ghachtouli, N. E. (2025). Comparative assessment of physicochemical properties, functional diversity and enzymatic activities in three *Opuntia ficus-indica* soils across diverse climatic regions in Morocco. *Scientific African*, *28*, e02663. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02663

8. Utilización de residuos agrícolas de México para la síntesis sustentable de puntos cuánticos de carbono mediante métodos de química verde*

Claudia Lorena Compeán González[1]
Rubén Ahumada-Lazo[2]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.08

Resumen

Este capítulo explora el uso innovador de los abundantes residuos agrícolas de México como precursores (biomasa) para la síntesis sustentable y escalable de puntos cuánticos de carbono (PCC) utilizando métodos de química verde. La utilización de residuos agrícolas no sólo aborda el apremiante problema de su gestión, sino que también proporciona una alternativa rentable y respetuosa con el medio ambiente para producir nanomateriales de alto valor. Al aprovechar los principios de la química verde, este enfoque minimiza el uso de sustancias peligrosas y reduce la huella medioambiental de los procesos de síntesis. Se analizan diversos residuos agrícolas, su composición química y su potencial en la producción de PCC. También se hace una reseña de los procesos de síntesis, las propiedades y las aplicaciones potenciales de los PCC, destacando su relevancia en electrónica, medicina, monitoreo y descontaminación ambiental. Por último, se abordan los retos que enfrenta la escalabilidad de los procesos de síntesis y se sugieren futuras líneas de investigación que permitan integrar prácticas sustentables en la síntesis de nanomateriales, contribuyendo a la economía circular y mejorando la cadena de valor de los residuos agrícolas en México.

* Capítulo derivado del proyecto UA-TEC Seed Fund "Sustainable and scalable synthesis of application-ready graphene quantum dots", financiado por University of Alberta y Tecnológico de Monterrey.

[1] Doctorante en Materiales. Catedrática en el Tecnológico de Monterrey, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2367-8450

[2] Doctor en Física. Profesor en el Tecnológico de Monterrey, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1524-9576

Palabras clave: *economía circular, residuos agrícolas, síntesis sustentable y escalable, nanomateriales.*

Introducción

Los puntos cuánticos (PC) han comenzado a popularizarse recientemente, gracias a su utilización para mejorar la calidad de la imagen en pantallas de televisión de las marcas líderes en el mercado y a que Moungi G. Bawendi, Louis E. Brus y Aleksey Yekimov fueron galardonados con el premio Nobel de química en 2023, por sus aportaciones para lograr la transición de la teoría a la práctica en el desarrollo de esa tecnología (Nevelius, 2023). Aunque hay algo de variación en los datos dependiendo de la fuente, el mercado mundial de los puntos cuánticos está dominado por una veintena de empresas a nivel global y se estimó en un valor cercano a los 6 billones de dólares en 2023, proyectando un crecimiento mayor a 5 840 millones a 2027, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR por sus siglas en inglés) del 16.34% (Technavio, 2023).

Los PC son nanopartículas tan pequeñas (menores a un par de decenas de nanómetros dependiendo del material), que sus propiedades ópticas y electrónicas están gobernadas por las leyes de la mecánica cuántica en lugar de las de la mecánica clásica o Newtoniana a la que estamos acostumbrados. Este fenómeno, conocido como confinamiento cuántico, surge de la discretización y separación de los niveles energéticos continuos conformados por los orbitales atómicos conforme se reduce el tamaño de los materiales. Esto permite seleccionar el color (energía o longitud de onda) de la luz que estas partículas pueden absorber y emitir por medio del control del tamaño de partícula durante el proceso de síntesis. Además, se puede controlar la química superficial de las nanopartículas, pasivando trampas energéticas generadas por defectos en la red cristalina del material (átomos faltantes, enlaces sueltos) con diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos para aumentar la eficiencia cuántica, o agregando moléculas funcionalizantes que otorgan propiedades específicas. Gracias a estas características, los PC han sido explorados para el desarrollo de aplicaciones que van desde pantallas a gran escala o para dispositivos móviles, fotode-

tectores, celdas solares, emisores de luz cuántica a nano escala para fotones entrelazados, láseres de umbral cero y captura de bioimagenes. También abundan las aplicaciones químicas, como en el tratamiento de aguas residuales, almacenamiento de energía, detección de gases y en biomedicina. Sin embargo, durante el desarrollo generalizado de los últimos años han surgido varios problemas. En primer lugar, los PC suelen estar compuestos por elementos peligrosos para el medio ambiente, tóxicos para la salud y a menudo escasos (costosos), como el plomo, el arsénico, el indio y el cadmio. Muchos países, incluida toda la Unión Europea, cuentan con legislaciones que restringen el uso de estos elementos. Los primeros puntos cuánticos que se desarrollaron estaban compuestos de calcogenuros de cadmio, pero, debido a estas restricciones, se comenzó a buscar otras alternativas en familias de materiales como los calcogenuros de zinc, calcopiritas terciarias de cobre y plata o perovskitas de haluros (Ahumada-Lazo, 2019; Guan et al., 2023). Sin embargo, estos materiales siguen presentando algunos elementos escasos o tóxicos y aunque ha habido grandes progresos para sustituirlos por otros, aún existen varios retos en cuanto a eficiencia y estabilidad por resolver (Tamang, Wegner y Reiss, 2025). En segundo lugar, la síntesis puede ser un proceso laborioso y que requiere mucha energía, lo que dificulta su evolución a aplicaciones industriales. Además, las propiedades de los puntos cuánticos, y por lo tanto sus aplicaciones, dependen fuertemente del control de las condiciones de proceso. Entre los desafíos que enfrenta el mercado de los puntos cuánticos, se enlistan la poca disponibilidad de materias primas, el creciente uso de elementos tóxicos y metales pesados que dañan al medio ambiente y a la salud humana y los bajos rendimientos de producción (Technavio, 2023). La capacidad de sintetizar puntos cuánticos a partir de materiales abundantes y seguros, utilizando procesos que preserven o, incluso, mejoren sus propiedades cuánticas, y sean amigables con el medio ambiente, podría resolver estos problemas y conducir a una adopción a mayor escala de esta tecnología.

Puntos cuánticos de carbono (PCC) y grafeno (PCG)

Recientemente, los nanomateriales a base de carbono han despertado interés como posibles sustitutos o complemento a los nanomateriales metálicos o de semiconductores. Los puntos de carbono fluorescentes (Carbon Dots en inglés) fueron descubiertos por accidente durante el proceso de purificación de nanotubos de carbono preparados mediante descarga de arco (Xu et al., 2004) y suelen clasificarse en dos grupos principales: puntos cuánticos de carbono (PCC) y de grafeno (PCG). Los PCG tienen forma circular o elíptica, son anisótropos, con dimensiones laterales mayores que la altura (como un disco), y poseen la estructura cristalina de una o unas cuantas capas de grafeno conectadas mediante grupos químicos en los bordes. En cambio, los PCC son siempre esféricos y se dividen en nanopartículas de carbono (NC) sin red cristalina (amorfos) y PCC que poseen una red cristalina evidente con hibridación de carbonos sp^2/sp^3 (Iravani y Varma, 2020). Los PCC y los PCG han demostrado propiedades optoelectrónicas avanzadas, baja toxicidad, procedimientos de síntesis sencillos y mayor rentabilidad en comparación con los puntos cuánticos basados en metales. Adicionalmente, los PCG, combinan las propiedades físicas únicas del grafeno otro material merecedor del premio Nobel de física en 2010 compuesto de capas atómicamente finas de carbono (Novoselov, Geim y Jiang, 2004), con los efectos ópticos cuánticos causados por el confinamiento local de electrones (es decir, el confinamiento cuántico). Los PCC y los PCG presentan fotoluminiscencia sintonizable, fotoestabilidad significativa, buena biocompatibilidad y dispersabilidad en agua. También se cree que tienen una toxicidad relativamente baja ya que no están compuestos por materiales sujetos a ninguna restricción legislativa a nivel internacional, lo que los hace muy prometedores para aplicaciones en bioimagen médica, biodetección, administración de fármacos y terapias para el cáncer. Sin embargo, la síntesis tradicional de PCG requiere métodos que consumen mucha energía y/o usan productos químicos agresivos, lo que conlleva inconvenientes significativos, como la contaminación ambiental y la complejidad inherente en su fabricación y en los pasos posteriores de procesamiento, como la separación y purificación,

lo que aumenta los costos y los riesgos de producción (Iravani y Varma, 2020; Le et al., 2023).

Métodos de producción de PCC y PCG

Los PCC y PCG pueden fabricarse utilizando estrategias descendentes y ascendentes (del inglés *top-down* y *bottom-up,* respectivamente). Los enfoques descendentes, utilizan generalmente procedimientos de corte químico o físico de estructuras de carbono relativamente grandes (microscópicas), como la descarga de arco, la ablación/pasivación por láser, la síntesis electroquímica y la oxidación química para controlar las dimensiones y morfología de los PC. Los precursores más comunes de estas técnicas son grandes dominios de carbono con hibridación sp^2 como fullerenos, diamante, grafeno, nanotubos de carbono y óxido de grafeno. Una ventaja de estos métodos es que pueden producir puntos cuánticos de tamaños uniformes y químicamente puros. Algunos de los inconvenientes de los enfoques descendentes son la necesidad de materiales y equipos caros y complejos (grandes inversiones y consumos energéticos), condiciones de reacción extremas (altas temperaturas, condiciones de alto vacío), tiempos de reacción largos y pasos posteriores de procesamientos complicados. La síntesis "ascendente" ha despertado un gran interés debido a su proceso de preparación sencillo y directo. Los PCC y PCG se sintetizan a menudo a partir de moléculas orgánicas pequeñas, como los compuestos fenólicos, mediante métodos ascendentes (Iravani y Varma, 2020; Arias Velasco, Agudelo, Hotza y Gómez González, 2023; Pooja et al., 2023). Dentro de las técnicas ascendentes más comunes se encuentran la síntesis asistida por microondas, síntesis hidrotermal, y la pirólisis térmica. Como su nombre lo indica, la síntesis por microondas utiliza la radiación electromagnética con longitudes de onda en el rango entre 1 mm a 1 m para romper los enlaces químicos y facilitar la formación de nuevas estructuras en tiempos cortos (menores a 10 minutos). Para preparar PCC y PCG por esta técnica, se han usado como precursores polietilenglicol, sacáridos como la glucosa y la fructosa, y ácido cítrico. Está técnica se puede combinar también con hidrotermal y pirólisis, con las cuales se han reportado la síntesis de PCG con un rendimiento cuántico

de emisión (PLQY por sus siglas en inglés) de entre 7% y 11% y de PCC que alcanzaron PLQY de aproximadamente 30% al usar grupos amino para pasivar sus superficies, respectivamente. La carbonización hidrotermal es una técnica rentable y eficiente que permite sintetizar PCC y PCG a partir de sacáridos, ácidos orgánicos u otros compuestos que contengan grupos amino y carboxilo. Los precursores orgánicos y agua como solvente se sellan en un reactor de teflón que se calienta a temperaturas moderadas (180-200 °C) para generar presiones altas dentro del reactor, generando una reacción de cuatro pasos; (1) deshidratación, (2) polimerización, (3) carbonización y (4) pasivación. Gracias a su simplicidad, esta técnica es una de las que se han adoptado mayormente para la síntesis de nanomateriales a partir de biomasa y otras fuentes de carbono, y una de las que presentan mayor potencial de escalabilidad. Sin embargo, el mecanismo de reacción depende fuertemente de la naturaleza de los precursores y se requiere más investigación para comprenderlo y controlarlo. Otros retos que resolver son los costos relativamente altos del recipiente de teflón y la autoclave de acero inoxidable que conforman el reactor, la dificultad de monitorear la reacción en tiempo real debido a la naturaleza cerrada del proceso, así como los riesgos asociados con las altas presiones y temperaturas (Ghosh, Sarkar, Devi, Kim y Kumar, 2021; Brachi, 2020). La pirólisis consiste en la degradación térmica de los precursores en ausencia de oxígeno, de manera que no se produce una combustión. Las propiedades de los PC obtenidos dependen también de los precursores y las temperaturas utilizadas durante el tratamiento. Brachi reportó que el proceso de ensuciamiento con hollín que sufren las esferas de alúmina empleadas como catalizador o material absorbente puede ser empleado para producir PCC con buenas propiedades por medio de pirólisis en condiciones moderadas de temperatura y tiempo, a partir de diferentes fuentes de biomasa de residuos agroindustriales. (Brachi, 2020). Normalmente, las técnicas de enfoque ascendente pueden producir PCC y PCG de mayor calidad, de manera más sencilla y con menos consumo de energía y recursos que las técnicas descendentes, pero los precursores tradicionales suelen ser solventes orgánicos volátiles muy tóxicos, lo que supone un grave riesgo medioambiental (Iravani y Varma, 2020; Pooja et al., 2023). En pocas palabras, los métodos ascendentes presentan mayor potencial de escalamiento para producción a nivel industrial, sin embargo,

hay que encontrar precursores abundantes, económicos y amigables con el ambiente, es decir, que provengan de fuentes naturales. Actualmente, no se ha establecido ningún método de síntesis que permita la producción de PC a gran escala, lo que ha limitado su uso generalizado en dispositivos optoelectrónicos a nivel industrial (Brachi, 2020).

Química verde

Desde principios de la década de 1990, la química verde ha servido de marco para que la industria química pueda contribuir a la sustentabilidad global, enfocándose en el desarrollo de procesos químicos y la exploración de metodologías de síntesis seguras, amigables con el medio ambiente y económicamente viables, que propicien la economía circular. Algunas de las estrategias, incluyen la reducción en la dependencia de combustibles fósiles y de la huella ambiental de los procesos de manufactura, así como del potencial de riesgo y la prevalencia de los productos químicos en el ambiente. Además del uso de materiales renovables y procesos limpios para reducir los impactos negativos, la química verde considera los riesgos toxicológicos de los productos desde su diseño y durante su uso y posconsumo, integrando el pensamiento sistémico y de ciclo de vida para proponer soluciones a largo plazo y verdaderamente sustentables. Algunas de las tendencias actuales se centran en la recuperación o sustitución de materiales críticos (o derivados de combustibles fósiles) por alternativas biobasadas, así como en la identificación de impactos a lo largo de todo el ciclo de vida para poder garantizar la seguridad y circularidad de los procesos y productos (Ganesh et al., 2021). Los procesos de síntesis de PC también se enfocan cada vez más en métodos más verdes para producir nanopartículas de alta calidad y minimizando su impacto ambiental. Entre las estrategias más comunes se incluye el uso de temperaturas más bajas y tiempos de síntesis más cortos, el uso de catalizadores y agua como principal solvente y el uso de residuos ricos en carbono de otros procesos como precursores (Arias Velasco, Agudelo, Hotza, y Gómez González, 2023; Gulati et al., 2023). En este sentido, los puntos cuánticos de carbono y grafeno (y otros nanomateriales), se pueden fabricar a partir de compuestos ricos en carbono provenientes de

plásticos, aguas residuales y fuentes biológicas mediante varios métodos de síntesis (Saha y Dutta, 2022; Pooja et al., 2023). Aunque la elección de precursores y métodos es un proceso complejo debido a la diversidad de combinaciones posibles y los múltiples factores involucrados, el uso de residuos orgánicos, provenientes de la agroindustria, resulta atractivo, ya que permite reducir costos y cerrar el ciclo de estos materiales, evitando que terminen en rellenos sanitarios o que su mal manejo cause problemas ambientales (Marmolejo Manjarrez, Perdigon-Lagunes, Compeán González, Sandoval Reyes y Ahumada-Lazo, 2026).

Residuos orgánicos en México

Actualmente los residuos sólidos urbanos (RSU) representan una problemática con importantes impactos ambientales y sociales, principalmente originados por la mala gestión de estos. En México, las prácticas de manejo de los RSU son inadecuadas o ineficientes, ya que no existe una separación de los residuos por tipo desde el origen que permita su reciclaje o aprovechamiento. Solo un 12% de la recolección es selectiva (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2019), a pesar de que existen instrumentos de gestión, como la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos *(Diario Oficial de la Federación,* 2003). Además, se estima que, de estos residuos, alrededor del 50% son materia orgánica o Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), principalmente compuesta por residuos alimentarios, residuos de jardinería y poda (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020). La mayoría de estos residuos terminan en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto que carecen de infraestructura para un correcto control y contención de emisiones y contaminantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020) contribuyendo al calentamiento global por la producción de gases de efecto invernadero, contaminación del suelo y el agua por los lixiviados generados y favorece la propagación de enfermedades por las plagas y vectores que se originan en estos sitios, representando también un riesgo para la salud (De Anda Trasviña, García Galindo, Peña Castañon, Seminario Peña, y Nieto Garibay, 2021). Tan solo en 2022 se recolectaron alrededor de 108 146 toneladas de

RSU, de las cuales, casi la mitad provenía de los estados de Ciudad de México, Estado de México, Jalisco, Veracruz, Nuevo León y Guanajuato (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2023; Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2024). Adicionalmente, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) identificó que para ese mismo año alrededor de 150 municipios de la república aún no contaban con un servicio de recolección de residuos, por lo que la población opta por la quema para desecharlos. Esta ausencia de recolección ocurre principalmente en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

Otra cuestión importante es la fuente de los residuos, que influye directamente en los requisitos para la gestión de estos. De acuerdo con inventarios de residuos anuales de la CDMX, la generación de residuos residencial representa alrededor del 47.7%, pero otros sectores que también contribuyen son el comercial (15.4%), servicios (13.6%), mercados (10.6%), Central de Abasto (4.6%), diversos (5.1%) y controlados (3%) (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2018). Por lo que podemos observar que las principales fuentes son los residuos domiciliarios y de actividades económicas (comercial, servicios y mercados).

Por otro lado, si bien una gran parte de los residuos orgánicos corresponden a los residuos sólidos urbanos (RSU), en México los residuos agroindustriales también representan un mercado de interés para atender. La agroindustria es definida como el conjunto de actividades relacionadas con trasformación de los productos procedentes de la agricultura, la ganadería, la pesca y lo forestal, es decir, elaboración de materias primas y productos intermedios derivados del sector agrícola (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 1997). En México se cultivan alrededor de 200 productos agrícolas destinados al consumo tanto nacional como internacional (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015) y los productos generados a partir de estas actividades son principalmente verduras, frutas, tubérculos, semillas, raíces, hojas y madera, de las cuales muchos se comercializan en fresco, pero también algunos son transformados a otros productos como aceites, harinas, jugos, néctares, vinos, conservas, entre otros. En la cosecha de cultivos se generan residuos primarios que provienen de operaciones de poda, corte, clasificación

y renovación de cultivos, como son: tallos, hojas, vainas, paja o frutos con calidad no comercial. Mientras que en la postcosecha se generan residuos secundarios obtenidos del procesamiento, como lo son cáscaras, bagazo, mazorcas y olotes, entre otros (Mejías-Brizuela, Orozco-Guillen y Galáan-Hernández, 2016).

Por la diversidad de las actividades, se llegan a generar varios tipos de residuos, pero la porción orgánica proviene principalmente de la agricultura y las actividades forestales. Estos residuos se rigen por la Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 (fracción III del Artículo 9), que clasifica a los Residuos de Manejo Especial *(Diario Oficial de la Federación,* 2013). En este caso los residuos orgánicos agroindustriales entran en dicha clasificación por su volumen de generación, superior a las 10 toneladas anuales. Sin embargo, esta legislación es poco específica y existen varios vacíos legales que aprovechan las industrias, por lo que es necesario promover la gestión de estos residuos asegurando un manejo integral desde su generación hasta su disposición final (Mejías-Brizuela, Orozco-Guillen y Galáan-Hernández, 2016).

Aunque se estima que las cantidades de residuos generados en estas actividades son altas, no existe un inventario preciso que determine los volúmenes o cantidades totales. Esto se debe principalmente al manejo de los residuos, que muchas veces son gestionados por los mismos productores sin cuantificarlos. Entre las prácticas más comunes entre los agricultores se encuentran la reincorporación de la biomasa al suelo, el compostaje, el aprovechamiento como forraje en la alimentación para ganado y, por último, una de las prácticas más utilizadas es la quema de restos de cultivos en el campo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015), una actividad que afecta la fertilidad de suelos por la pérdida de nutrientes, eliminación de organismos y microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica, modificando los procesos de aireación del suelo y liberación de nutrientes (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024), además de provocar en algunos casos incendios que salen de control afectando otras áreas naturales.

Una de las estimaciones más precisas de residuos orgánicos de la agroindustria, hasta el momento en nuestro país, es el Atlas Nacional de Biomasa (ANBIO), un estudio realizado por la Secretaría de Energía en co-

laboración con la Comisión Federal de Electricidad, con la finalidad de ubicar las principales fuentes generadoras de biomasa que puede ser utilizada con fines energéticos (Secretaría de Energía, 2018), debido a la reciente Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México *(Diario Oficial de la Federación,* 2008). Los resultados mostraron que, en el año 2012, la biomasa y la biomasa residual estimada era aproximadamente 278 millones de toneladas de residuos sólidos, donde el 58% provenía de los bosques y 27% de los residuos agrícolas y forestales (Secretaría de Energía, 2018). La biomasa residual se clasificó en cuatro grupos, de acuerdo con las actividades productivas más importantes que generan materia orgánica: agrícola y forestal, pecuaria, urbana e industrial; mientras que la biomasa, se consideró como la generada a partir de cultivos para fines energéticos. La porción correspondiente al total de la generación de biomasa residual agrícola fue de 52.102 millones de toneladas en base seca, durante tiempo de cosecha considerando sólo 20 cultivos temporales y 21 cultivos perennes (tabla 8.1).

Tabla 8.1. *Tipos de cultivos y especies consideradas en el Atlas Nacional de Biomasa*

Tipos de cultivo	***Especies incluidas***
Cultivos perennes	Agave, aguacate, café, cereza, caña de azúcar, coco, guayaba, limón, maguey pulquero, mandarina, mango, manzana, naranja, nopales, palma africana, papaya, piña, plátano, tangerina, toronja, tuna y uva.
Cultivos temporales	Algodón hueso, brócoli, calabacita, cebada en grano, cebolla, chile verde, elote, fresa, frijol, garbanzo grano, maíz grano, melón, papa, pepino, sandia y zanahoria

Fuente: Secretaría de Energía (2018).

Finalmente, aunque existen algunas alternativas para contribuir al manejo de la porción orgánica de los residuos en nuestro país, como su aprovechamiento mediante métodos de compostaje, lombricomposta, biodigestión, incineración e incluso tecnologías más avanzadas como la generación de biocarbón (Escalante Rebolledo et al., 2016) o la biorrefinería (Jacob-Lopes, Queiroz Zepka y Costa Deprá, 2022), estás practicas no son generalizadas y sólo atienden un porcentaje muy pequeño del mercado (aproximadamente 56 427 toneladas por día, que representa sólo el 7%) (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2017) y (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020). Uno de los principales problemas para la im-

plementación de dichas alternativas es la complejidad o el alto costo (De Anda Trasviña, García Galindo, Peña Castañon, Seminario Peña y Nieto Garibay, 2021), y que, desafortunadamente, los productos generados no representan un mercado de valor que permita cubrirlo. En los últimos años se han incrementado los esfuerzos para buscar promover estas alternativas de gestión de los residuos orgánicos para disminuir sus impactos ambientales. Sin embargo, aún se requiere la caracterización de los residuos para determinar con mayor precisión la cantidad real generada y su composición y, de esta forma seleccionar el proceso o sector donde puede ser aprovechado de mejor manera y, con ello, lograr productos con alto valor añadido generando ingresos extras para los productores, o buscar la disposición final apropiada por no tener un valor comercial, es decir su disposición como desecho orgánico.

Biomasa de residuos agrícolas como precursores para PCC y PCG

El conocimiento de los componentes presentes en la materia orgánica residual es útil para evaluar la posibilidad de utilizarlos como materia prima en algunos procesos o emplearlos como fuentes de compuestos de interés, permitiendo su revalorización. Aunque estos residuos tienen composición variable, hay algunos componentes en común como la celulosa, lignina, hemicelulosa, pectina, lípidos, proteínas, azúcares y almidón, entre otros (Sanchez-Silva, González-Estrada, Blancas-Benitez y Fonseca-Cantabrana, 2020; Saval, 2012; Díaz-Montes, 2022). Algunos de estos componentes son de difícil degradación, lo que limita su manejo para ciertos procesos (Mejías-Brizuela, Orozco-Guillen y Galáan-Hernández, 2016), mientras que para otros los vuelve más atractivos, por ejemplo, en aplicaciones biotecnológicas como sustratos atractivos para la producción de enzimas de aplicación industrial (Saval, 2012). También, los elementos, compuestos o grupos funcionales que pueden aportar estos residuos son de interés para una serie de aplicaciones como la absorción de metales pesados (Sanchez-Silva, González-Estrada, Blancas-Benitez y Fonseca-Cantabrana, 2020), la remoción de contaminantes, sustratos fermentables (fuentes de C o N) o sustra-

tos no convencionales, la obtención de disoluciones de azúcares u otros compuestos de interés como el ácido láctico, la producción de pigmentos o antibióticos (Barragán Huerta, Téllez Díaz y Laguna Trinidad, 2008), e incluso para la fabricación de materiales compuestos y resinas termoplásticas (Tronc et al., 2007).

La biomasa residual es una fuente económica, renovable, rentable, confiable y natural de carbono para la síntesis de PCC y PCG (Kadyan et al., 2023), pero, además, el resto de los compuestos presentes en la misma influyen en sus propiedades y potenciales aplicaciones en diversos campos como la biomedicina o la energía. Dentro de los compuestos de interés aprovechados para la síntesis de PCC y PCG con propiedades especificas están azúcares como la glucosa, fructosa o sacarosa, ácidos como el cítrico y el ascórbico, los compuestos fenólicos, y los grupos hidroxilo, carboxilo o carbonilo (Ravi y Vadukumpully, 2016). Por otro lado, varios autores han investigado el uso de biomasa como precursor en la síntesis de PCC y PCG. Algunas de las materias primas que han utilizado son cáscara de arroz, residuos de té, bagazo de caña de azúcar, cáscaras y hojas de frutas como el mango, el coco, el plátano o la naranja, diversas partes del maíz, granos de cacao o café, por mencionar algunos (Kadyan et al., 2023; Kumar Saha y Dutta, 2022).

Propiedades, ventajas y aplicaciones de los PCC y PCG

Como se mencionó anteriormente, los PCC y PCG presentan ciertas ventajas generales respecto a los puntos cuánticos de metales o semiconductores, por ejemplo, biocompatibilidad debido a su baja toxicidad, hidrosolubilidad, propiedades ópticas y eléctricas avanzadas, y menor costo. Sin embargo, las aplicaciones particulares de estos materiales dependen de sus propiedades específicas, las cuales están determinadas por los precursores, los métodos y las condiciones de síntesis. De esta manera, se puede impartir diferentes propiedades como fotoluminiscencia dependiente del tamaño o de la energía de excitación, emisión estable o parpadeante, superficies hidrofílicas o hidrofóbicas y moléculas en la superficie que permitan ampliar sus aplica-

ciones a campos que incluyen la ciencia de materiales, la química, la física, la biología y la medicina. Una de las características más deseadas en un lote de PC, es la uniformidad en morfología y tamaños de partícula. Aunque algunos de los métodos de síntesis facilitan esto, por lo general se requieren procesos adicionales de purificación y separación, como la filtración, centrifugación, y diálisis. En cuanto a estructura, la mayoría de los autores que reportaron la síntesis de PCC por diferentes métodos, observaron núcleos de carbono amorfo y una variedad de grupos funcionales en la superficie, mientras otros reportaron la existencia de estructuras de carbono cristalino sp^2, grafito, óxido de grafito, y estructuras como la del diamante dentro del núcleo, dependiendo del método de síntesis y el precursor utilizado. Por otro lado, los PCG muestran muy buena cristalinidad que se origina de las capas de grafeno que los conforman. En ambos casos, se observan grupos funcionales que contienen oxígeno en las superficies. Los PCC preparados por métodos ascendentes presentan menos defectos estructurales que los preparados por métodos descendentes, debido probablemente a la mayor oxidación superficial. Estos defectos imparten estados energéticos que se originan de los orbitales moleculares y actúan como trampas de cargas, limitando su movilidad y afectando la fluorescencia. Las superficies se pueden pasivar para eliminar estas trampas, adhiriendo grupos poliméricos que funcionan como aislante o por medio de tratamientos ácidos que blindan los PC contra impurezas. También se han usado diversos grupos químicos como diaminas, tioles, hidracinas, y alquilaminas para funcionalizar las superficies de PCC. Estos generalmente actúan como donadores de electrones, previniendo la recombinación no radiactiva y mejorando el rendimiento de emisión (PLQY). Los PCG, poseen una estructura electrónica muy similar a la de grafeno con la diferencia de que los efectos de confinamiento cuántico modifican el ancho de banda prohibida (del inglés *band gap)* que es de "cero", para grafeno 2D a "no-cero" para los PCG (0D), influenciada además por los efectos de los dopantes o grupos funcionales en la superficie. Los PCC, al estar formados por moléculas orgánicas, presentan estructuras electrónicas definidas por la teoría de orbital molecular con un total de cinco orbitales moleculares asignados σ, π, n (no enlazantes), σ* (antienlazante), y π* (antienlazante). Las transiciones posibles entre estos orbitales originan la absorción en el rango UV-visible (σ/σ* a ~125 nm, n/σ* a ~150-

250 nm, π/π * a ~200-400 nm y n/π * a ~400-700 nm). Esto tiene aplicaciones en fotodetectores y en la captura y conversión de energía solar. Los PCG generalmente muestran absorbancias relativamente más débiles en comparación con los PCC, con máximos a ~380 nm que se origina de la transición n/π* entre enlaces C=O y los grupos funcionales. En ambos tipos de puntos cuánticos, la forma de los espectros de absorción se puede modificar cambiando estos grupos funcionales, o pasivando las superficies. Otra forma de impartir propiedades especiales es mediante el dopaje con átomos de elementos como azufre, nitrógeno, boro, calcio, telurio, selenio, fosforo, silicio, o halógenos. Estos elementos modifican la estructura electrónica y las bandas energéticas de los PC, impartiendo nuevas propiedades. La emisión de luz (fotoluminiscencia) de los puntos cuánticos surgen de la recombinación radiativa de las cargas (electrones y huecos) que se pueden generar mediante excitación dentro de ellos. Estos procesos de recombinación son potenciados por el efecto de confinamiento cuántico. Además, la energía de absorción y emisión se puede ajustar mediante el control de los tamaños de partícula. Los PCC pueden presentar bajas eficiencias de emisión (menores al 15%) debido a que los defectos o grupos funcionales en la superficie pueden atrapar las cargas, evitando su recombinación radiativa. Mediante la pasivación de las superficies, se pueden eliminar estas trampas y mejorar significativamente las eficiencias de emisión. En general, los PCG presentan mejores propiedades de emisión debido a su cristalinidad y estructura de capas que los PCC. Sin embargo, se requiere más investigación para comprender completamente los mecanismos. Ambos tipos de puntos cuánticos presentan fotoestabilidad, lo cual es una propiedad muy deseable en materiales emisivos. Los grupos funcionales también pueden modificar las propiedades eléctricas de los PCC/PCG que suelen ser análogas a las del óxido de grafeno, mejorando su conductividad (Ghosh, Sarkar, Devi, Kim y Kumar, 2021; Arias Velasco, Agudelo, Hotza y Gómez González, 2023; Gulati et al., 2023). Gracias a estas características y a la facilidad de modificarlas mediante la funcionalización de la superficie, los PCC y PCG han encontrado una gran variedad de aplicaciones que aprovechan sus propiedades ópticas, eléctricas, y la capacidad de los grupos funcionales para producir diferentes efectos o reacciones químicas. Por ejemplo, en fotodetectores (de banda ancha o regiones específicas del espectro), cuyo principio consiste en con-

vertir los fotones absorbidos por el material fotosensible en una señal eléctrica. Igualmente se pueden fabricar biosensores para la detección de enfermedades, así como diferentes tipos de sensores para varios elementos y compuestos, como metales pesados, iones, moléculas orgánicas como glucosa, dopamina, ácido úrico, antibióticos, e incluso otras nanopartículas. También se han propuesto sensores de propiedades como temperatura, pH, y conductividad eléctrica. Una de las aplicaciones más prometedoras de los puntos cuánticos a base de carbono es en la bioimagen médica. Esta consiste en observar y detectar ciertas moléculas y tejidos en el cuerpo mediante métodos no invasivos. Los puntos cuánticos de metales y semiconductores se han usado desde hace tiempo para sustituir a los colorantes tradicionales que se usan como marcadores en las técnicas de bioimagen médica, debido a sus propiedades superiores como su fotoestabilidad y emisión más eficiente, con energías sintonizables y de espectros angostos, lo que facilita su detección, así como su inercia química. Sin embargo, existe preocupación por la toxicidad de estos materiales y sus efectos negativos para la salud, por lo que los PCC y PCG resultan muy atractivos gracias a su biocompatibilidad. Por otro lado, se ha encontrado que los PCC y PCG presentan actividad antimicrobiana mostrando buena actividad para el control de bacterias como *E. coli, S. aureus* y *P. aeruginosa*. Adicionalmente, los PCG se han utilizado como nanotrasportadores en sistemas de distribución de medicamentos dentro del cuerpo, por ejemplo, con el medicamento para el cáncer DOX. También, se han fabricado tintas a base de puntos cuánticos para agregar marcas de agua anti-falsificación a diversos bienes como, documentos, códigos de barras, y dinero, o para la encriptación de información (Zhao et al., 2023). En el área ambiental, los PCC también han encontrado aplicaciones en la adsorción de contaminantes en medios acuosos y gaseosos, y se han usado en combinación con otros materiales para formar compósitos con buena actividad en la degradación fotocatalítica de contaminantes o en la producción de combustibles como H_2 y H_2O_2. Otros compósitos de PCC se han utilizado en dispositivos de almacenamiento de energía como baterías y supercapacitores. Gracias a su amplio espectro de absorción y sus buenas propiedades conductoras, también se han incorporado PCC en las diferentes capas que componen las estructuras de "sándwich" de las celdas solares; en las capas trasportadoras de huecos y electro-

nes, como material principal o como dopantes en la capa activa (absorción de luz) y como espaciadores entre capas, para promover la separación de cargas, aumentando la eficiencia de conversión de fotones a electrones (Pooja et al., 2023; Arias Velasco, Agudelo, Hotza, y Gómez González, 2023). Una de las aplicaciones de los puntos cuánticos más desarrolladas actualmente, son los dispositivos emisores de luz o LEDs por sus siglas en inglés, tanto para iluminación como para pantallas de dispositivos, como se ha observado con la entrada al mercado de las QLED TVs. Estas pantallas ofrecen ventajas como una gama de colores más amplia, mayor contraste y resolución (pixeles por pulgada) que las pantallas de TV convencionales, así como la posibilidad de fabricar pantallas de gran formato, como anuncios espectaculares o la esfera de Madison Square Garden en Las Vegas Nevada en un futuro. Por supuesto, los PCC y PCG también ha comenzado a remplazar a los PC de metales y semiconductores en estas aplicaciones y se han reportado LEDs de luz blanca fabricados a partir de películas fluorescentes tricolor de PCG, en los cuales se ajustaron los tamaños de partículas para lograr emisiones de color azul y verde, mientas la emisión roja se logró controlando el contenido de oxígeno y los enlaces C=N durante los procesos de síntesis (Zhao et al., 2023). Sin duda, continuaremos viendo grandes avances en la síntesis y funcionalización de estos nanomateriales, así como el surgimiento de nuevas aplicaciones que irán avanzando a niveles industriales y etapas comerciales, conforme se vayan solucionando los problemas ambientales y de escalabilidad antes mencionados.

Oportunidades, retos y perspectiva para México

En verano de 2023 en el Tecnológico de Monterrey región Ciudad de México conformamos un nuevo grupo de investigación multidisciplinario, gracias a un fondo semilla que surge del acuerdo de colaboración con la Universidad de Alberta, para explorar la síntesis sustentable y escalable de puntos cuánticos a base de carbón a partir de residuos agroforestales en México y de asfalteno (subproducto del bitumen) en Canadá. Para apoyarnos en la compleja tarea de navegar la amplia variedad de posibles precur-

sores, métodos de síntesis y propiedades reportadas en la literatura, y que se han mencionado de manera resumida en este capítulo, desarrollamos un modelo matemático de optimización que nos permite seleccionar las condiciones más apropiadas y aterrizadas al contexto mexicano. El modelo, implementado en Python, utiliza programación lineal de enteros mixtos para maximizar el éxito del proyecto teniendo en cuenta criterios como la disponibilidad de precursores, la priorización de residuos y la distancia al lugar de síntesis. Un caso de estudio realizado en Ciudad de México demuestra la eficacia del modelo en la identificación de escenarios óptimos y la asignación de recursos. Los resultados revelan las combinaciones preferidas de precursores y métodos de síntesis, y resaltan la adaptabilidad del modelo a las distintas ponderaciones de los criterios de evaluación. Una ventaja del modelo es su capacidad para evaluar rápidamente diferentes circunstancias y ayudar en la toma de decisiones, lo que mejora su robustez. Por otra parte, el modelo puede escalarse fácilmente ya que el coste computacional es bajo, pudiendo beneficiarse de alimentarlo con bases de datos más grandes y diversificadas para lograr mejores resultados, así como incorporar modelos de visualización como Power BI (Marmolejo Manjarrez, Perdigon-Lagunes, Compeán González, Sandoval Reyes y Ahumada-Lazo, 2026).

Con base en este estudio y las capacidades técnicas a nuestro alcance, decidimos comenzar con la exploración del método de síntesis hidrotermal a partir de hojas y olote de maíz *(Zea mays)* y cáscaras de naranja *(Citrus sinensis),* siguiendo los procedimientos reportados por (Eskalen, Yaykaşlı, Kavgacı, y Kayış, 2022; Wang et al., 2022; Prasannan e Imae, 2013), respectivamente. Esto con el objetivo de analizar la viabilidad de omitir los pretratamientos ácidos que los autores utilizaron para acondicionar sus precursores o sustituirlos por otros más acordes a los principios de la química verde. Los resultados preliminares son prometedores, ya que logramos obtener nanopartículas fluorescentes a partir de los tres precursores con y sin pretratamiento. Los espectros de absorción de las nanopartículas producidas a partir de hoja de maíz con y sin pretratamiento son prácticamente idénticos, presentando curvas suaves con máximos en el ultravioleta (~260 nm), con una cola que se extiende hacia el visible hasta aproximadamente los 550 nm. Por otro lado, los materiales a partir de olote también presentan

espectros similares, sin embargo, para la muestra con pretratamiento ácido, se observa una característica con forma de hombro (~300 nm) y un desplazamiento de la cola hacia el azul, con respecto a la del material sin pretratamiento, sugiriendo diferencias estructurales y en la distribución de tamaños de partícula. En el caso de los materiales preparados a partir de cáscara de naranja se observa la forma de hombro (~390 nm) para el espectro sin pretratamiento, pero un desplazamiento de la cola hacia el rojo en comparación con el material pretratado. En fotoluminiscencia, los espectros de excitación y emisión muestran concordancia con los de absorción, pero se necesita mayor análisis para interpretarlos correctamente. También se caracterizaron los precursores y los productos por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y estos últimos también por dispersión dinámica de luz (DLS) y microscopía electrónica de transmisión (TEM) para determinar tamaños y composición química. Sin embargo, estos análisis y su interpretación siguen en proceso para la redacción de un artículo científico, por lo que no podemos dar más detalles en este momento. Los siguientes pasos serán investigar las dinámicas de las cargas generadas en estas nanopartículas, con apoyo de nuestro colaborador en la Universidad de Alberta y su laboratorio de espectroscopía ultrarrápida, para determinar sus aplicaciones más apropiadas.

Como muchos autores han demostrado, la síntesis de PCC y PCG a partir de diversos residuos orgánicos y por medio de métodos de química verde es posible, al menos a escala de laboratorio. Sin embargo, aún se requiere más investigación sobre la relación entre precursores, métodos, características fisicoquímicas, propiedades y aplicaciones, para poder impartir propiedades y funciones de forma intencionada y sistémica, así como para resolver algunos problemas identificados como, bajas eficiencias de emisión, baja absorbancia y poca conductividad intrínseca. El siguiente reto es lograr la producción homogénea y a gran escala, basada en química verde y que además resulte económicamente viable. Para esto, se requiere partir de materias primas económicas y abundantes (como los residuos orgánicos) y utilizar métodos que generen productos de alta calidad y con altos rendimientos de producción.

En México se producen grandes cantidades de estos precursores potenciales. Sin embargo, se requiere más trabajo de investigación para ana-

lizarlos y determinar cuáles son los más adecuados. Igualmente, se requiere una mejora general en su gestión para que puedan ser aprovechados y generen valor agregado en lugar de convertirse en un problema ambiental. Las tecnologías actuales para el tratamiento de residuos orgánicos como las plantas de carbonización hidrotermal pueden contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto y tratar de certificarse para monetizar a través del mercado de créditos de carbono. En la Ciudad de México existe un módulo de este tipo con la capacidad de procesar 72 toneladas de residuos orgánicos al día para producir energía y pellets de carbón vegetal, pero el proyecto completo contempla 36 de estos módulos (Dirección General de Comunicación Social, 2024). Esta tecnología se puede adaptar y/o utilizar en conjunto para la producción de PCC y PCG que utilicen residuos valorizables como materia prima, para generar productos de mayor valor comercial, y con ello, mayor ingreso económico para los productores primarios si saben aprovecharlo. La situación actual de la diplomacia internacional puede ser una oportunidad para que México encuentre un lugar en el mercado que pudiera darse por la guerra comercial entre las principales potencias en electrónica y materiales críticos. Si no, por lo menos asegurar la autosuficiencia para que no nos lleven entre las patas.

Conclusión

Los puntos cuánticos son una tecnología emergente que se ha desarrollado impresionantemente rápido y con gran potencial para mejorar la vida de las personas gracias a sus múltiples aplicaciones en medicina, química, ciencias ambientales y optoelectrónica. Sin embargo, es necesario tomar una postura sustentable a la hora de desarrollar tecnología y escalar los métodos de producción. Esto es posible y además puede resultar económicamente atractivo si se hace de manera informada y correcta, para lo que se necesita hacer investigación continua que permitan la innovación y la transferencia tecnológica. También, es necesario contar con inversionistas con visión y capital para absorber los costos mientras se recupera la inversión. El mercado de los PC es creciente y diversificable y a través de la economía circular, se puede lograr minimizar los costos de la materia prima por medio de con-

venios de colaboración entre productores y transformadores para una gestión más eficiente de residuos y proyectos más rentables. Esto además generaría beneficios sociales y ambientales, como la creación de empleos especializados y la mejora del entorno y la calidad de vida en las comunidades. La economía circular, aplicada al desarrollo tecnológico de nanomateriales para diversas aplicaciones de interés comercial, tiene el potencial de desafiar el status quo y abrir el mercado a economías emergentes como la de México, que presentan varios desafíos, pero también enormes oportunidades.

Referencias

Ahumada-Lazo, R. (2019). *Surface properties and charge dynamics in semiconductor microcrystals and nanocrystals.* University of Manchester.

Arias Velasco, V., Agudelo, A. C., Hotza, D. y Gómez González, S. Y. (2023). Context and prospects of carbon quantum dots applied to environmental solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 1-34.

Barragán Huerta, B. E., Téllez Díaz, Y. A. y Laguna Trinidad, A. (2008). Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales, 2*(1), 44-50.

Brachi, P. (2020). Synthesis of fluorescent carbon quantum dots (CQD's) through the mild thermal treatment of agro-industrial residues assisted by γ-alumina. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1301-1312.

Comisión para la Cooperación Ambiental. (2017). *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético.*

De Anda Trasviña, A., García Galindo, E., Peña Castañon, A. Z., Seminario Peña, J. V. y Nieto Garibay, A. (2021). Residuos orgánicos: ¿basura o recurso? *Recursos Naturales y Sociedad, 7*(3), 19-42. https://doi.org/10.18846/renaysoc.2021.07.07.03.0004

Diario Oficial de la Federación. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf

Diario Oficial de la Federación. (2008). Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en México. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf

Diario Oficial de la Federación. (2013). NOM-161-SEMARNAT-2011. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5286505&fecha=01/02/2013

Díaz-Montes, E. (2022, septiembre-diciembre). Residuos agroalimentarios ¿qué son? ¿quién los genera? y ¿por qué son valiosos? *Frontera Biotecnológica*, 9-16.

Dirección General de Comunicación Social. (2024, 25 de diciembre). México reducirá gases de efecto invernadero con planta de carbonización hidrotermal. *Boletín UNAM*.

Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo

Alves, J., Valtierra Pacheco, E. y Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana, 34*(3), 367-382.

Eskalen, H. yaykaşlı, H., Kavgacı, M. y Kayış, A. (2022). Investigating the PVA/TiO2/CDs polymer nanocomposites: Effect of carbon dots for photocatalytic degradation of Rhodamine B. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 4643-4658.

Ganesh, K. N., Zhang, D., Miller, S. J., Rossen, K., Chirik, P. J., Kozlowski, M. C., … y Voutchkova-Kostal, A. M. (2021). Green chemistry: A framework for a sustainable future. *Environmental Science & Technology*, 8459-8463.

Ghosh, D., Sarkar, K., Devi, P., Kim, K.-H. y Kumar, P. (2021). Current and future perspectives of carbon and graphene quantum dots. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Guan, X., Li, Z., Geng, X., Lei, Z., Karakoti, A., Wu, T., … y Vinu, A. (2023). Emerging trends of carbon-based quantum dots: Nanoarchitectonics and applications. *Small*, 1-65.

Gulati, S., Baul, A., Amar, A., Wadhwa, R., Kumar, S. y Varma, R. S. (2023). Eco-friendly and sustainable pathways to photoluminescent carbon quantum dots (CQD's). *Nanomaterials*, 1-40.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2019. Módulo 6: Residuos sólidos urbanos.* https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2019/

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020, 3 de junio). *Estadisticas a propósito del Día Mundial del Medio Ambiente.* https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2020/ambiente2020_Nal.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México (CNGMD).* https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2023/

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). *Marco geoestadístico (MG).* https://www.inegi.org.mx/temas/mg/

Iravani, S. y Varma, R. (2020). Green synthesis, biomedical and biotechnological applications of carbon and graphene quantum dots: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 703-727.

Jacob-Lopes, E., Queiroz Zepka, L. y Costa Deprá, M. (Eds.). (2022). *Handbook of waste biorefinery.* Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06562-0

Kadyan, P., Malik, R., Bhatia, S., Al Harrasi, A., Mohan, S. yadav, M., … y Arasu, T. (2023). Comprehensive review on synthesis, applications, and challenges of graphene quantum dots (GQD's). *Journal of Nanomaterials*, 1-26. https://doi.org/10.1155/2023/2832964

Kumar Saha, J. y Dutta, A. (2022). A review of graphene: Material synthesis from biomass sources. *Waste and Biomass Valorization*, 1385-1429. https://doi.org/10.1007/s12649-021-01577-w

Le, T., Qian, L., Sheng, Q., Meiqin, L., Jinwoo, S., Pan, W., … y Jong, S. K. (2023). Recent developments in carbon dots: A biomedical application perspective. *Journal of Materials Chemistry B*, 3038-3053.

Marmolejo Manjarrez, F., Perdigon-Lagunes, P., Compeán González, C. L., Sandoval

Reyes, M. y Ahumada-Lazo, R. (2026). Optimization methodology for project management: A case study for Quantum Dots Synthesis. *AIP Conference Proceedings (Accepted)*. AIP.

Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillen, E. y Galán-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 27-41.

Nevelius, E. (2023, 4 de octubre). *The Nobel Prize in Chemistry 2023*.

Novoselov, K., Geim, A., S. V ., M. y Jiang, D. Z. (2004). Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 666-669.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1997). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*.

Pooja, K., Rohit, M., Saurabh, B., Ahmed, A. H., Syam, M., Mansi, Y., … Thillai, A. (2023). Comprehensive review on synthesis, applications, and challenges of graphene quantum dots (GQD's). *Journal of Nanomaterials*, 1-26.

Prasannan, A. y Imae, T. (2013). One-pot synthesis of fluorescent carbon dots from orange waste. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 15673-15678.

Ravi, S. y Vadukumpully, S. (2016). Sustainable carbon nanomaterials: Recent advances and its applications in energy and environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 835-856. https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.11.026

Saha, J. K. y Dutta, A. (2022). A review of graphene: Material synthesis from biomass sources. *Waste Biomass Valorization*, 1385-1429.

Sanchez-Silva, J. M., González-Estrada, R. R., Blancas-Benitez, F. J. y Fonseca-Cantabrana, Á. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 23*, 1-18. https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.261

Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Pasado, presente y futuro. *Biotecnología, 16*(2), 14-46.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015, octubre). *Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas. Primera etapa: diagnóstico nacional.* https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346963/Manejo_de_Residuos_Reporte_Ejecutivo.pdf

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). *Iniciativa gubernamental "Mi parcela no se quema".* https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/miparcelanosequema

Secretaría de Energía. (2018). *Atlas nacional de biomasa.* https://www.gob.mx/sener/articulos/atlas-nacional-de-biomasa

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020, mayo). *Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos.* https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/diagnostico-basico-para-la-gestion-integral-de-los-residuos-2020

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2018). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México.* https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/IRS-2018-JUNIO.pdf

Tamang, S., Wegner, K. D. y Reiss, P. (2025). *Quantum dot material systems, compositional families.* John Wiley & Sons.

Technavio. (2023). *Quantum dots market size to grow by USD 5,842.61 million from 2022 to 2027; Growth driven by rising demand for optimized devices.* PR Newswire.

Tronc, E., Hernández-Escobar, C., Ibarra-Gómez, R., Estrada-Monje, A., Navarrete-Bolaños, J. y Zaragoza-Contreras, E. (2007). Blue agave fiber esterification for the reinforcement of thermoplastic composites. *Carbohydrate Polymers, 67*, 245-255.

Wang, Y., He, Q., Zhao, X. yuan, J., Zhao, H., Wang, G. y Li, M. (2022). Synthesis of corn straw-based graphene quantum dots (GQD's) and their application in PO43- detection. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K. y Scrivens, W. A. (2004). Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *Journal of the American Chemical Society*, 12736-12737.

Zhao, Y., Bingli, G., Guo, G., Li, Y., Li, T., Zhu, Y., … y Chen, D. (2023). Bright tunable multicolor graphene quantum dots for light-emitting devices and anticounterfeiting applications. *ACS Applied Nano Materials*, 3245-325.

9. Círculos agroculturales del cacao: Innovación y prácticas de sostenibilidad hacia una marca comunitaria en Tabasco

Carlos Arturo Olarte Ramos[1]
Viviana Castellanos Suárez[2]
Yazmín Isolda Álvarez García[3]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.09

Resumen

La cosecha y transformación del cacao atraviesa por un proceso de prácticas agroecológicas que favorecen la diversidad de productos con valor nutrimental, a la par de promover la cohesión familiar, el desarrollo comunitario y la identidad cultural. En este documento se explica un modelo de economía circular que se diseñó con técnicas de participación social, con productores y productoras de cacao en el estado mexicano de Tabasco, que tiene el objetivo de representar las fases que se realizan para generar derivados del cacao para el consumo nacional e internacional. Se desprende de una investigación-acción participativa[4] realizada en 2024 sobre economía circular y desarrollo comunitario; el resultado fue un modelo que promueve círculos de sostenibilidad en cada fase del proceso, transversalizado por tres niveles de participación social: el familiar, el comunitario y el intercomunitario. Además, el modelo de economía circular en el cacao representó uno

[1] Doctor en Psicología. Profesor-investigador de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9534-5153
[2] Doctora en Solución de Conflictos y Derechos Humanos. Profesora-investigadora de tiempo completo de la licenciatura en Psicología en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. ORCID https://orcid.org/0000-0003-2506-8207
[3] Doctora en Estudios Jurídicos. Profesora-investigadora de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. ORCID https://orcid.org/0000-0002-0587-0406
[4] El proyecto se titula "Hombres de agua y tierra: Identidad y cuidado en grupos comunitarios", con registro PRODECTI-2022-01/62, en el Consejo se Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco (CCYTET).

de los factores por el que los cacaoteros gestionan una marca colectiva para competir en el mercado local, nacional e internacional, y seguir innovando para mantener la vigencia en los consumidores.

Palabras clave: *producción artesanal, transformación del cacao, economía circular, microempresas familiares, círculos de sostenibilidad.*

Introducción

La dinámica económica de Tabasco tiene tres pilares fuertes: la producción del campo, la industria petrolera y las actividades del sector servicios.

De acuerdo con reportes del Gobierno del Estado (2024), las actividades primarias, integradas por la agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza, registraron un aumento anual de 3.1% durante el tercer trimestre de 2024, en comparación con el mismo periodo de 2023; las secundarias, correspondientes a la industria de la minería, manufacturas, construcción y electricidad, reportaron una disminución de −11%; y las terciarias, donde se encuentran los ramos dedicados a la distribución de bienes y aquellas actividades relativas a operaciones con información o con activos, así como a servicios cuyo insumo principal es el conocimiento y la experiencia de personal, obtuvieron un aumento de 0.4%.

Se aprecia que el mayor crecimiento es el sector primario, donde la agricultura representa la principal actividad en Tabasco; su potencial sigue siendo amplio por el gran mercado que representan los habitantes de la entidad, quienes producen y consumen alimentos del campo como maíz, frijol, arroz, plátano, así como hortalizas, carne de aves de corral, pescado y ganado; además, existe la tendencia hacia una alimentación sana, local y sustentable, lo que implica un impulso a los productos de la región.

Respecto a la industria petrolera, aunque la construcción de la refinería Olmeca Dos Bocas generó altas expectativas respecto al desarrollo económico de la entidad, lo cierto es que opera de forma parcial, por lo que el sector se mantiene por la fabricación de productos derivados del petróleo y del carbón, la industria química, así como la industria del plástico y del hule; además, a largo plazo se proyecta un descenso en la producción, ya

sea porque el petróleo es un recurso no renovable o por situaciones del contexto, como una crisis económica a nivel internacional, un conflicto bélico entre naciones, o bien, la caída de los precios del petróleo. Tabasco registró de 1985 a 2000 un panorama desalentador en esta industria, donde después del *boom* petrolero en los 70 del siglo XX, "coexistían en Tabasco una aparente modernidad urbana junto con una precaria y dispersa población rural; paradójicamente, también registraba el mayor ingreso per cápita del país, pero ocupaba el lugar número 27, de 30, en los indicadores del desarrollo social" (Rabelo Ávalos, Ramos Muñoz, Díaz Perera y Mesa Jurado, 2021).

En cuanto al sector servicios, en 2024 operaban en Tabasco 140 391 establecimientos en los que laboraban 619 302 personas; en ese total predominaban las microempresas, e incluye establecimientos que iniciaron operaciones en 2024, establecimientos en zonas rurales, los servicios públicos y asociaciones religiosas, así como establecimientos del sector privado y empresas paraestatales (INEGI, 2025).

Ha sido el sector primario el que ha mantenido su crecimiento aun en situaciones de crisis, derivado de la necesidad de alimentación de la población que crece de forma constante, por lo que la agricultura, la ganadería y la pesca representan actividades básicas para el desarrollo social. Además, existe un cambio de hábito de consumo de la población en Tabasco, donde es cada vez mayor la preferencia de productos directamente del campo, específicamente de los que están libres de algún tipo de químicos.

Esto significa que aumentará la demanda de aquellos alimentos producidos de forma artesanal, donde se utilicen recursos propios de la región, y que, a la par, contribuyan a mantener un estilo de vida más saludable. En Tabasco se han organizado grupos comunitarios que realizan trabajo artesanal: conservas, dulces, comida, bebida, fermentos y otros productos para el consumo doméstico, y en algunos casos, para la venta al menudeo en zonas específicas. Son las mujeres quienes tienen mayor participación, sobre todo en las actividades relacionadas con la recolección de frutos, crecimiento da aves de corral, cocción de alimentos y cosecha de hortalizas; en cambio, los varones se involucran más en la siembra y la pesca, así como en la producción de fertilizantes, ladrillos, panes y lácteos.

Esta dinámica de economía doméstica resulta ser una ocupación que coadyuva en el sostenimiento de los gastos familiares, además de impul-

sar la colaboración, convivencia y conocimiento entre pares, que abonan a la cohesión social. Ejemplo de esto son los chivalitos en Macuspana, quienes tejen hilo de seda para elaborar hamacas; los artesanos del bejuco motusay en Tacotalpa, quienes trabajan la cestería y la ebanistería; en Jalapa hay viveros familiares en la producción de pescado; en Comalcalco hay grupos que generan derivados del cacao; artesanías con fibras vegetales, tul espadaño y caña, son elaborados en Nacajuca; por mencionar algunos.

Sin embargo, en esa producción artesanal se desaprovechan parte de los recursos naturales porque no le encuentran utilidad, tales como el agua, fibras vegetales y semillas. Reflexionar sobre más usos que se les puede dar a tales recursos naturales, seguramente generarían nuevas materias primas para otros productos; o bien, aprovechar recursos poco utilizados, tales como la fruta del uspí, caimito y jícara que se cosechan en regiones de Tabasco, así como plantas que crecen en los pantanos.

Por lo anterior, sería interesante que el modelo de producción artesanal esté basado en los principios de la economía circular, donde se busca el sostenimiento de los recursos a partir del máximo aprovechamiento de insumos y mayor periodo de utilidad de la producción.

En este documento se resalta la oportunidad que ofrecen el agua y la tierra de las comunidades de Tabasco para aplicar un modelo más eficiente de producción con los recursos naturales, donde quienes participen colaboren entre iguales y obtengan, además de ingresos económicos, cohesión social; en específico, se desarrolla un modelo de economía circular para aprovechar al máximo la cosecha y transformación del cacao, producto que da identidad cultural al estado.

Desarrollo

a) Tradición agrícola hacia lo circular

Las diversas modalidades de organización comunitaria representan el acercamiento más próximo a los grupos de producción que se han establecido en el territorio tabasqueño. Cooperativas, juntas comunales, juntas de ve-

cinos y asociaciones civiles son algunas de las formas en que las personas se reúnen para fines comunes, entre ellas, las de corte ecológico y ambiental.

Una forma de organización comunitaria son los centros integradores, que en Tabasco datan de 1985, los cuales representan el punto que, por ubicación geográfica, es el de mayor atracción entre un grupo de comunidades dispersas, definidos para abastecer de mercancías y servicios básicos a la población que habita en el medio rural, a fin de evitar el desplazamiento hacia las cabeceras municipales o la capital del estado (Dzib Moo, Falcón Jiménez y González Dzib, 2018).

Se cuenta, además, con asociaciones que han surgido ante la necesidad de responder a situaciones específicas; en el caso del ámbito económico comunitario, existen organizaciones que han trabajado recursos propios de su espacio geográfico, tales como los grupos encabezados por varones de "agricultura campesina indígena", en las comunidades chol localizadas en Tacotalpa (Sosa Cabrera, 2014), varones que capturan y mujeres que procesan el ostión, en las zonas lagunares de Paraíso (Aldana Aranda, 2008); "la Sociedad Cooperativa Embajadoras del Cacao y Sociedad de Producción Rural Cacaste Los sabores de Tabasco al mundo, ambas lideradas y constituidas por mujeres productoras de cacao originarias de la región de Grijalva y que se localizan en Comalcalco" (Martínez-Salvador y Martínez-Salvador, 2020, p. 14), queserías artesanales que se ubican en Tenosique, Balancán, Comalcalco, Centro y Huimanguillo; así como los talleres de mujeres que aprovechan frutas de la región para elaborar conservas, los cuales funcionan en Balancán, Nacajuca y Paraíso.

En estos grupos se registra mayor participación de la población femenina, más cuando se trata de actividades de transformación del recurso natural, ya que están vinculadas con el trabajo doméstico.

En cuanto a programas económicos, informes de la Secretaría para el Desarrollo Económico y la Competitividad del Estado de Tabasco (En Alimentos, 2020), indican que la entidad consolidó la exportación de cacao, chile morrón, chile habanero, semilla de coco, pimienta, azúcar, limón persa, plátano, piña y jugos cítricos, lo que permite avizorar el aumento de productos que se envían a otros estados o países, y que implica una mayor inversión en el campo.

Los programas Pro-Árbol y Sembrando Vida representan impulso al trabajo del campo en beneficio de las comunidades. Durante el sexenio federal 2006-2012, Pro-Árbol buscó, entre otros objetivos, disminuir los índices de pobreza y marginación en áreas forestales, mediante la inducción a un manejo y uso adecuado de sus recursos naturales; para ello ejecutó en todos los estados de la República Mexicana el Programa de Desarrollo Forestal Comunitario, vía Comisión Nacional Forestal (Conafor), con el que se organizaron comunidades escuelas para integrar cuadros técnicos locales a fin de apoyar y fortalecer procesos y proyectos de desarrollo comunitario en ejidos/comunidades (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2012).

El programa Sembrando Vida representa una estrategia de desarrollo rural para fortalecer la economía campesina, que en Tabasco ha venido a la baja: de un padrón inicial en 2019 de 70 915 beneficiarios, pasó a 53 605 personas en junio de 2024 (Arias, 2024); sin embargo, se han registrado malos manejos en el programa, como cuando la Auditoría Superior de la Federación (ASF) alertó que en la entidad se otorgaron recursos a beneficiarios que no formaban parte de la población objetivo, sin que la dependencia indicara las causas (Peralta, Ortega y Arista, 2021).

Respecto al fomento de modelos de economía circular en la dinámica tabasqueña, la Secretaría para el Desarrollo Económico y la Competitividad (Sedec) de Tabasco realizó en diciembre de 2021, una jornada sobre economía circular para

> promover entre el empresariado tabasqueño la adopción de este nuevo modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido […] de lo que se trata es de trazar una ruta para instaurar en la entidad modelos de negocios que tengan como corazón una economía circular que les ayude a reducir el gasto de materiales innecesarios, y a aprovechar de forma más eficiente sus recursos. (Gobierno del Estado de Tabasco, 2021)

En enero de 2022 inició la construcción de una planta recicladora de PET en Cunduacán, que incluye instalación de 18 centros de acopio de ma-

terial PET en el Sureste (Gobierno del Estado de Tabasco, 2022). Para atender la necesidad de capacitación al respecto, el Gobierno del Estado, a través de la Sedec, recibirá asistencia técnica de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), a fin de elaborar e implementar una política industrial que incorpore "instrumentos como enfoques de economía circular y parques industriales, junto con otras medidas para promover la diversificación económica y atraer inversiones productivas" (ONUDI, 2022, párr. 2).

Tales acciones dan cuenta que los primeros pasos para implementar la economía circular en Tabasco se están dando, sin embargo, no se tiene registro sobre el trabajo comunitario con varones que desde la perspectiva de género se puede realizar, sobre todo, cuando se pretende resignificar la identidad y construcción social de la masculinidad en las tareas de cuidado.

b) Semilla con valor histórico

El cacao nace de una pequeña flor blanca llamada "rosita del cacao", allí comienza la magia y así es como lo explican quienes cultivan este tesoro cultural. El árbol de cacao lleva el nombre de *Theobroma cacao* L., vocablo griego que significa alimento de los dioses; la palabra *cacao* deriva del maya *cacau,* formado de los vocablos *cac* = rojo y *cau* = fuerza y fuego (Arrazate et al., 2011).

Es un legado multidimensional, es decir, involucra diferentes aspectos, espacios, facetas o magnitudes, y, además, está unido a la idiosincrasia individual y colectiva. El cacao contiene, tanto en su historia como en su producción, a los tiempos pasado, presente y futuro, ya que se cultiva, seca, tuesta, muele, mezcla y queda listo para disfrutarse en sus diferentes usanzas y estados de la materia; cada vez que se habla del cacao se da referencia a la dimensión que lo contiene y al origen ancestral, como si al probarlo cada uno se convirtiera en analista sensorial, lo cual cobra razón al tomar en cuenta que contiene triptófano, sustancia que calma la ansiedad, el estrés, mejora el estado anímico (De Barros et al., 2022) y favorece en el ser humano la recuperación del bienestar (Chango et al., 2025).

Dado a su origen milenario, el cacao está inserto tanto en festividades como en celebraciones, está grabado en la gastronomía regional, estatal, nacional e internacional. Se aprecia también en elementos eróticos, históricos, mitológicos, literarios, cinematográficos, cosméticos; está presente en la creación de artesanías y hasta en turismo cultural y el ecoturístico; por algún tiempo fungió como una moneda mesoamericana que consistía en el intercambio de granos de cacao, siendo este un dinero mercancía donde cada unidad valía para el intercambio de productos y darle su valor en cacaos e incluso falsificándolo al rellenar sus hollejos con barro (Weatherford, 1998, p. 42).

Al cacao lo circundan también símbolos de poder, riqueza, tradición, pérdida y resiliencia; Triviño (2013) menciona la presencia del cacao en la pintura de vasos del clásico maya como testimonio del alto valor que la bebida tenía entre la clase rectora, además de la fuerte presencia en otras culturas mesoamericanas, en donde están presentes el fruto y la bebida en pinturas, códices, vasijas y jícaras que contenían la suculenta bebida reservada para el final en comidas de lujo; agrega que tanto el cacao como su bebida, el cacáhoatl (agua de cacao), eran parte importante, en especial del pueblo mexica convertido en un imperio que llegaba hasta las tierras productoras de cacao, el Soconusco y Tabasco; refiere que para el imperio mexica el cacao era uno de los más importantes tributos, moneda de mucho valor y subraya su valor como elemento inspirador de poesía y de ser una bebida de sumo placer y compañía en momentos de gozo; así mismo menciona que existieron momentos históricos de cambio social, donde el cacao deja de ser moneda, se abarata y pasa a ser bebida de todos, pipiles y macehuales y, sobre todo, de mujeres, finalmente señala que se debe a los olmecas el haber inventado el proceso transformación de un fruto amargo en bebida.

En este panorama multifacético, también el caco enfrenta sinsabores y pesares, concretamente factores de salud para quien lo cosecha, socioeconómicos y parasitológicos en la producción, problemas con las marcas y vacíos en apoyos de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales para quien lo transforma. De acuerdo con Castellanos Suarez (2024), los factores de estrés intralaboral están presentes desde el proceso de cultivo hasta la comercialización, como lo es la sobrecarga de trabajo y el daño

al cuerpo por la postura de la jornada, las manos y uñas ante el desgrane, los pulmones ante el tostado, los pesticidas, rayos solares, además de moscas, víboras y también factores de estrés extralaboral como las condiciones de cambio climático y la presencia de violencia en su entorno social comunitario tales como secuestro, delincuencia organizada, extorsiones y robos; ambos estresores se traducen en mellar la salud física, psíquica y comunitaria.

Respecto a los factores socioeconómicos y parasitológicos que limitan la producción, Gómez et al. (2015) refieren que los agricultores de cacao comienzan a diversificar sus actividades económicas para cubrir sus necesidades de ingresos; agregan que las parcelas presentaban amenazas como la moniliasis, también manchas negras de la mazorca, ocasionada por *Phytophthora capsici Leonian,* agallas de ramas, asociadas a *Fusarium* sp., *antracnosis* en hojas y frutos, asociada a *Colletotrichum gloeosporioides Penz;* también está presente el llamado mal de machete a causa del hongo Ceratocystis cacaofunesta, asociado al insecto barrenador; señalan los autores que el factor parasitológico resulta poco rentable y costoso al aplicar las medidas de control en los cultivos, por lo que el agricultor pierda el interés al destruirse la producción y con ello se genera el abandono del campo de cultivo o se remplaza por uno frutal.

En su organización social, los productores de cacao buscan pertenecer a asociaciones para acceder a recursos financieros y de capacitación gubernamentales; se utilizan los jornaleros para mano de obra en la limpia, poda y regulación de sombra, y también la mano de obra familiar en la cual se aprecia que los hombres producen y las mujeres participan en actividades de cosecha, lavado, fermentación y secado, pero no son consideras o incluidas como un apoyo significativo en el proceso de producción, comportamiento masculino que ya ha sido observado en otros cultivos.

De tal forma que en la industria del cacao representa retos y oportunidades, desde la plantación hasta la comercialización incluyendo su registro de marca para la protección jurídica de sus signos distintivos, derivándose así que ante el difícil panorama que aqueja a las cacaoteras, se requiere atención inter y multidisciplinaria, para ello existen asociaciones o iniciativas universitarias como lo es el caso del proyecto Efecto Cacao (Luján Sáenz, 2023), cuyo objetivo es mejorar la calidad de vida de cacaocultores

en regiones de Colombia, invirtiendo en tres componentes: productividad, asociatividad social y emprendimiento.

En ese panorama surgen las siguientes interrogantes: ¿cómo se promueven los círculos de sostenibilidad en el trabajo con el cacao?, ¿cuáles son las prácticas agroecológicas y culturales inmersas en el proceso?, ¿cómo participan la familia y la comunidad?, entre otras preguntas que se esperan encontrar en el presente estudio que invita a no perder de vista que el cacao va a la industria y merece ser tratado con su carácter milenario y respeto a las comunidades indígenas y campesinas herederas del cacao.

Metodología

Se realizó una investigación cualitativa con diseño de acción participativa para promover el diálogo entre productores y transformadores del cacao con el equipo de trabajo, a fin de conocer el proceso artesanal de producción de los derivados de esta semilla. Este ejercicio forma parte de un proyecto comunitario realizado de junio de 2023 a noviembre de 2024, el cual se conformó por dos fases: el diagnóstico y la intervención. Para el diagnóstico se realizaron recorridos, observación y entrevistas exploratorias en tres comunidades de corte rural de Tabasco: Poblado Hidalgo, municipio de Comalcalco; Poblado Mazateupa, municipio de Nacajuca; y Villa Tapijulapa, municipio de Tacotalpa, donde se transforman recursos naturales en productos de consumo alimenticio y de ornato. Para la intervención se decidió trabajar únicamente en el municipio de Comalcalco, debido a cuestiones de tiempo, economía y distancia geográfica; en esta etapa se realizaron entrevistas en profundidad y talleres relacionados con la economía circular.

Comalcalco es un municipio ubicado en la Chontalpa de Tabasco; es el principal productor de cacao en el estado y es considerado el tercero en importancia económica en la entidad. Cuenta con 117 localidades, entre ellas, la ciudad de Comalcalco (que es la cabecera municipal), Ciudad Tecolutilla, Villa Chichicapa, Villa Aldama, Poblado Cupilco, Poblado Hidalgo, Ranchería Zapotal, Ranchería Arroyo Hondo y Ranchería Arena (INEGI, 2010).

Cada año se realiza la Feria del Cacao en la cabecera municipal, y fue en la edición de 2023 donde se hizo contacto con dos productores y transformadores de cacao: Hacienda Don Isidro, localizada en el Poblado Hidalgo, y Cooperativa Rural La Perla de las Arenas, en la Ranchería Arena. En ambos lugares se realizaron entrevistas en profundidad y se desarrollaron talleres, por lo que fueron espacios de reunión con productores y productoras de la región, con quienes han conformado una red comunitaria para solventar la demanda de productos en el municipio, estado y región sur de México.

En la Hacienda Don Isidro se trabajó con quienes provienen de Ciudad Tecolutilla y de las rancherías Centro Tular, Galeana y Emiliano Zapata; ellos y ellas producen chocolate en distintas variedades de sabor y presentación, así como polvo para preparar bebidas (avena con cacao, cocoa, polvillo) mermelada, vino, aceites, bisutería y artesanías. En la Cooperativa Rural La Perla de las Arenas se dialogó con sus integrantes, quienes viven en las seis secciones de la Ranchería Arena, donde se especializan en la elaboración de polvillo, con sabor a pimienta, que es el agregado que lo hace diferente en sabor a otras marcas en el mercado local.

Considerando que el taller es una técnica cualitativa que implica un espacio para construir saberes a partir de la experiencia y compartimiento de quienes participan respecto a una temática en específico, además de "promover habilidades para la vida, mediante la experimentación, la creación y la expresión artística" (Rodríguez Luna, 2012, p. 13), se organizaron talleres para conocer la dinámica sociocultural y laboral en la producción y transformación del cacao, en un encuentro entre pares para aprender de todos y todas. El taller se realizó como una práctica pedagógica que implicó la participación bidireccional del equipo de investigación con los hombres y mujeres del cacao, donde se promovió, como sugiere Ander Egg (1991), el aprender haciendo, la participación dinámica, la pedagogía de la pregunta, el trabajo interdisciplinario, las tareas comunes, la integración de saberes y el trabajo grupal.

Tanto en la Hacienda Don Isidro como en la Cooperativa Rural La Perla de las Arenas se realizaron tres talleres, con duración de dos horas cada uno, con una participación promedio de 15 productores y productoras. Los temas abordados fueron: (1) Economía circular y proyectos pro-

ductivos, (2) Cuidado del recurso natural y (3) Género e identidad cultural; el primero, en específico, versó sobre los preceptos de la economía circular, a partir del cual se trabajó el diseño del modelo sobre el proceso artesanal de producción de los derivados del cacao.

El taller sobre economía circular y proyectos productivos tuvo como objetivo el aprendizaje de los conceptos básicos de la economía circular para aplicarlos en el proceso de transformación del cacao y en las actividades cotidianas que realizan en las comunidades productoras de cacao, a fin de utilizar mejor sus herramientas de trabajo y suministros; en abril de 2024 se realizó en la Hacienda Don Isidro, con la producción de chocolate, y en mayo de 2024, en la Cooperativa Rural La Perla de las Arenas, con la producción de polvillo. Para ello se organizó a los participantes en equipos de trabajo para identificar, una vez explicada lo que es sostenibilidad, las prácticas que hacen que el proceso artesanal sea una forma de aplicar la economía circular.[5]

Esta metodología generó el diseño de un modelo de economía circular que promueve prácticas de sostenibilidad en cada fase del proceso, transversalizado por tres niveles de participación social: el familiar, el comunitario y el intercomunitario.

Resultados

Se presenta únicamente el resultado del primer taller, a partir del cual se identificaron 4 fases en el proceso artesanal de producción, indistintamente si es para el chocolate o para el polvillo. La elaboración artesanal de ambos productos implica un ritual que empieza desde la selección de la semilla para la siembra hasta la cosecha, la transformación y comercialización del producto final que es el chocolate y sus derivados; a continuación, se explican las fases, considerando las prácticas de sostenibilidad.

[5] Se agradece la participación de quienes representan las marcas: Don Isidro Chocolates, Cacaste, Zery, Amarte Guayo, Vejjel Chocolates, Alexarte, Cacaocultores La Candelaria, Cooperativa Rural La Perla de las Arenas, Milla Cosmética y Cazuela, Comal y Cacao.

a) Fase 1. Selección y siembra de la semilla

Comienza con la selección de los granos, que deben extraerse de mazorcas que se encuentren en el tallo de la planta. Las semillas escogidas son las que, al abrir la mazorca, están en la parte de en medio del racimo, debido a que son las que conservan mejor los nutrientes del árbol; tales semillas se colocan en un recipiente seco, que debe ser tapado con hoja del árbol de cacao y con bolsas de nylon para provocar humedad y calor, para que en un máximo de tres días empiecen a germinar.

Las bolsas donde se sembrarán los granos deben ser llenadas con tierra enriquecida con composta; los brotes germinados serán sembrados y cuidados para su crecimiento; el resto del grano, que no germinó, es utilizado como parte de la composta. La plántula debe cuidarse durante tres meses, tiempo necesario para su trasplante en el terreno.

b) Fase 2. Cultivo y cosecha

Una vez sembrado el árbol, es sugerible que el terreno de cacao sea trabajado con técnicas agroecológicas, a fin de mantener árboles frutales y maderables cuyas ramas serán la sombra del cacaotal. Durante el crecimiento del árbol de cacao será necesario hacer podas de formación, a fin de ayudar a la planta a que crezca recta y no tan alta, con ramificaciones poco abundantes para que el paso del aire, la luz solar y favorecer la fecundación de la floración. También se hace poda severa para eliminar las ramificaciones no productivas que solo ocupan un espacio y retrasan la producción, así también cuando es necesario eliminar un árbol de cacao debido a la edad avanzada, previo a la cual ya se cuidó y se cultivó un retoño que viene desde el tallo, a fin de que crezca como suplencia del árbol que se quitará.

La cosecha se hace una vez que las mazorcas del cacao están maduras, es decir, en color que va del amarillo a púrpura; muchas mazorcas no desarrollan y se secan en una etapa de formación llamada chilillos, y muchas de ellas de utilizan para la elaboración de bisutería, o bien, para composta. Las mazorcas que están en las ramas del árbol son cortadas y desgranadas para que esas semillas sean utilizadas como insumos en la fase 3; las ma-

zorcas que están en el tallo del árbol, serán destinadas para la germinación de la semilla (descrita en la fase 1). Las hojas del árbol de cacao se utilizan como insumo para infusión o para composta, y las ramas que resultaron de la poda, para artefactos de cocina o para leña.

c) Fase 3. Desgranado, secado y selección

De las mazorcas se extraen las semillas del cacao, las cuales vienen cubierta por una pulpa blancuzca que se llama mucílago. La cáscara de las mazorcas, en específico la que conserva la forma ovalada y la que no tengan roturas, es recurso para elaborar artesanías; la que pierde forma o se rompe, se convierte en composta.

La semilla obtenida puede ser tratada en uno de tres procesos: lavado (para eliminar el mucílago) y secado al sol, secado al sol tal cual se extrae de la mazorca (se le conoce como "beneficiado") o fermentación. Cuando se lava, el agua con mucílago se utiliza para el riego de otras plantas; el mucílago se utiliza, entre otras cosas, para la elaboración de agua fresca, nieve o mermelada. Cuando se opta por fermentarla, se deja en un recipiente tapado.

Una vez secadas o fermentadas, son seleccionadas aquellas que no tienen ninguna alteración en su forma y color, que no se hayan quebrado y que no tengan ningún indicio de putrefacción; además, se eliminan residuos de hojas, raíces y troncos.

d) Fase 4. Transformación, empaquetado y comercialización

Las semillas que fueron discriminadas por estar oscuras, incompletas, deformes y pequeñas, se utilizan como insumo de golosinas como cacao garapiñado o cacao en polvo (útil para la preparación del chorote).

Las semillas seleccionadas se tuestan, ya sea en el comal sobre fogón o en una tostadora eléctrica; ya tostadas son descascaradas, cuyo residuo es utilizado para la composta. Lo que sigue será la molienda, ya sea en el me-

tate con metlapilli o en molino manual o eléctrico, para transformarlas en los derivados del cacao, entre ellos, el chocolate y el polvillo.

En el caso del chocolate, se muele varias veces hasta obtener la pasta amarga que será el chocolate, que puede dejar así o agregarle otro insumo, como leche, azúcar, especias o semillas; una vez obtenido el chocolate, se coloca sobre un molde para darle forma y tamaño a la presentación. Para el empaquetado, se requiere que el chocolate esté macizo bajo temperatura; las presentaciones son diversas: desde amargo, semiamargo o dulce, en tabletas alargadas o redondas, hasta en polvo o en pasta. A cada presentación, dependiendo de quien lo produce, se le coloca un empaque con el logotipo de la organización comunitaria, para lo que utilizan papel encerado o de aluminio o bien, frascos o bolsas, todo en condiciones de higiene bajo recomendación de asesoría técnica especializada.

En el caso del polvillo, al cacao tostado se le agrega maíz, canela y pimienta (o alguna otra semilla o especie) tostados, para ser mezclado y triturado en molino manual o eléctrico en dos o tres pasadas para obtener un polvo fino, es decir, el polvillo. Después se coloca en una bolsa para ser pesado y obtener presentaciones de kilo o de medio kilo; la bolsa es de nylon o es plastificado, y puede o no llevar el logotipo de la organización productora.

La fase final implica la comercialización, que puede realizarse en las ferias campesinas, de casa en casa, distribuirlas en el mercado o centros comerciales, además de publicitarlas en redes sociales. La entrega del producto puede ser a domicilio o a través de envíos, generalmente en cantidades grandes de chocolate que implica el uso de bolsas y cartones.

e) Círculos de sostenibilidad

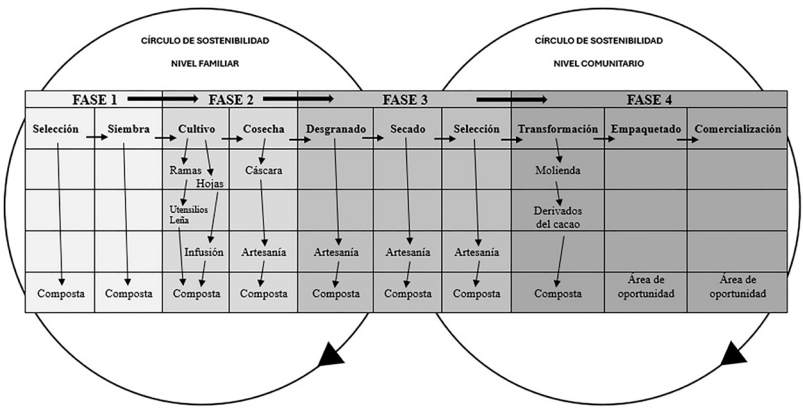
La economía circular "es un ciclo de desarrollo continuo positivo que preserva y aumenta el capital natural, optimiza los rendimientos de los recursos y minimiza los riesgos del sistema, gestionando stocks finitos y flujos renovables" (Cerdá y Khalilova, 2016, p. 12); "es un paradigma que tiene como objetivo generar prosperidad económica, proteger el medio ambiente y pre-

venir la contaminación, facilitando así el desarrollo sostenible" (Prieto-Sandoval et al., 2017, p. 86).

Entre sus principios están la sustentabilidad y sostenibilidad, donde la primera implica la permanencia del recurso natural a partir del uso razonable y de la capacidad de regeneración del recurso, para no comprometer su disponibilidad en un futuro a través de procesos que los preservan, protejan y conservan; y la segunda, los procesos equilibrados que se necesitan desarrollar en nuestras actividades sociales y económicas para crear un entorno social mejor y más respetuoso con el planeta, con el fin de asegurar una disponibilidad de recursos para futuras generaciones.

Los círculos de sostenibilidad (prácticas y procesos sociales) que se identifican para la producción artesanal del chocolate son tres: el familiar, el comunitario y el intercomunitario *(vid.* figuras 9.1 y 9.2). En tales procesos están implícitas las prácticas agroecológicas y los símbolos culturales, por ello son de sostenibilidad.

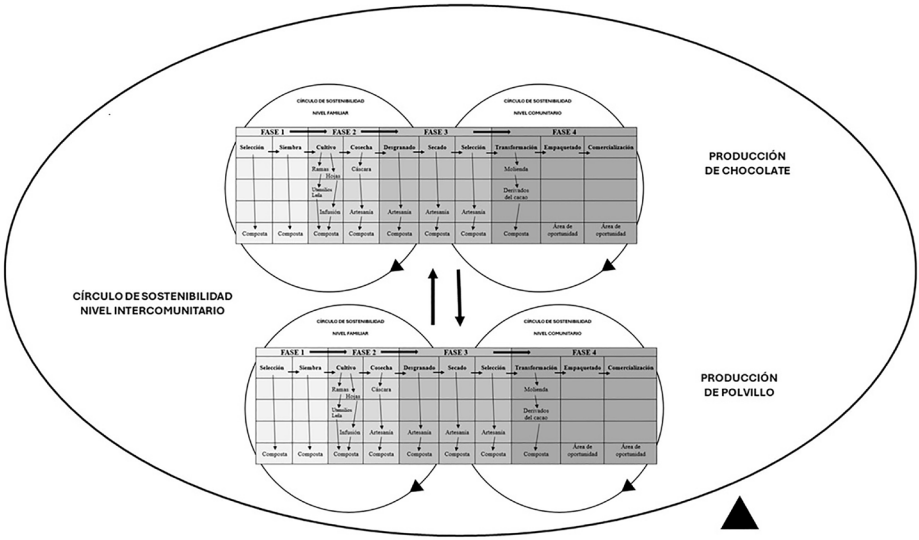
Figura 9.1. *Modelo de economía circular aplicado al proceso de transformación del cacao*



Fuente: elaboración a partir de la socialización en el taller.

En el familiar, se entiende que los integrantes del núcleo cooperan para preservar la herencia cultural en la producción de cacao y elaboración de chocolate o polvillo, por lo que el relevo generacional se hace necesario, lo que implica que quienes realizan las prácticas artesanales en este momento histórico les enseñen a generaciones pequeñas, que pueden ser la descendencia familiar u otras personas de la localidad.

Figura 9.2. *Modelo de economía circular en una red de apoyo intercomunitario*



Fuente: elaboración a partir de la socialización en el taller.

En el comunitario, se pretende que los grupos familiares de la comunidad se apoyen entre sí, de tal manera que los insumos que produzca una familia sea de utilidad para otra, y que entre familias o habitantes de la comunidad, se apoyen para la producción colaborativa del cacao y su posterior transformación, ello entonces requiere que haya cohesión comunitaria para que genere el apoyo mutuo de abastecimiento de insumos que se produzca en la misma localidad, y que la producción sea un beneficio común.

En el intercomunitario se busca que la fortaleza de un espacio geográfico en cuanto a insumos, infraestructura y recursos económicos apoyen a otro espacio geográfico que requiera ser auxiliado, acompañado u orientado para establecer un mejor proceso de producción, esto es, si una comunidad no cuenta con la capacidad para satisfacer la demanda del mercado local, estatal o nacional, ya sea por el limitado recurso humano, económico o natural, o por la falta de infraestructura, puede ser apoyada por otra comunidad que cuente con los insumos y herramientas para la elaboración a mayor de escala del producto; ello representaría la oportunidad de exportación nacional e internacional, y sobre todo, aprovechar la deman-

da del chocolate y polvillo artesanal. En este círculo será necesario trabajar una marca colectiva, donde las marcas particulares colaboren entre sí para agregar valor al producto ofertado.

Es posible apreciar que en todas las fases del proceso artesanal de producción se aprovecha al máximo el recurso, ya que lo que pudiera ser considerado como sobrante o un elemento que haya sido discriminado, es utilizado como insumo para otro proceso (que está señalado con las flechas dentro del esquema), y como última instancia, se convierte en composta para nutrir la tierra y el cacaotal, por lo que, en palabras de quienes lo trabajan, "todo se aprovecha, nada se desperdicia".

Se identifica una primera área de oportunidad en la última fase, donde una vez empaquetado el producto, el desecho del material que se utiliza ya no depende de quien lo produce sino de quien lo consume, es decir, los hombres y mujeres del cacao ya no están en posibilidad de aprovechar el empaque porque el producto está en manos de quien lo compró. Lo que sí es posible hacer es aprovechar el empaque para divulgar recetas de cocina ancestral, diseños artísticos o experiencias literarias, que invite al consumidor a guardarlo para evitar que se convierta en basura; aun así, dependerá de quien lo consuma el que el envoltorio se convierta o no en un desecho.

Asimismo, se aprecian los círculos donde participan la familia y la comunidad (figura 9.1) y el apoyo que pueden darse entre comunidades (figura 9.2). En la familia es necesario el relevo generacional para mantener el proceso artesanal de producción y abastecer con sus productos la demanda del mercado local; en la comunidad, es necesaria la participación de las familias para abastecer la demanda municipal y regional, donde lo que produce una familia completa la producción de otra, de tal forma que en la comunidad se teje una red comercial de apoyo para aprovechar el requerimiento de los derivados del cacao. Para la demanda estatal y nacional, se requiere la vinculación entre comunidades dada la cantidad de productos que se necesitan, por lo que lo que una comunidad hace completa lo que otra elabora. Es ahí donde surge la segunda área de oportunidad: la marca colectiva, con la intención de comercializar los productos en el mercado internacional, de tal forma que se visibilicen todas las marcas, por pequeña que sea, en la totalidad de productos que pueden ser exportadas.

Conclusiones: hacia una marca colectiva

El proceso artesanal es un ritual porque involucran prácticas y símbolos (ofrendas, danzas, cantos, gestos o actuaciones), y se llevan a cabo de forma repetitiva y voluntaria por personas relacionadas culturalmente, en lugares y tiempos determinados (Broda, 2001; Radic, 2002). En el proceso de producción artesanal se hace evidente la presencia de prácticas ancestrales heredadas de abuelos y padres, así como el legado cultural que encierra la siembra y cosecha del cacao y su transformación a chocolate; los símbolos culturales son reflejados en el metate y el metlapilli para la molienda, así como tollas y canastos y cayucos para la fermentación, cuyo uso da cuenta del legado ancestral de grupos culturales como el maya y el chontal, basta mencionar que este proceso artesanal está estrechamente relacionado con personas cuyos rostros y cuerpos dan cuenta de su arduo trabajo y que son quienes dan soporte y energía al círculo, su destreza conocimientos, creatividad, saberes, usos, costumbres y tradiciones, son vitales para que este ciclo conserve su conexión con el pasado, la unicidad del presente y el esmero para la visión hacia el futuro.

El camino recorrido a través de los círculos de sostenibilidad en la producción artesanal del cacao en Tabasco ha permitido vislumbrar una posibilidad concreta: consolidar una marca colectiva que resguarde y potencie el legado de quienes día a día siembran, transforman y comparten esta semilla milenaria. No se trata solo de mejorar las condiciones de venta o de posicionar un producto en el mercado; detrás de esta oportunidad está la historia viva de las comunidades, sus saberes transmitidos de generación en generación, y la necesidad urgente de adaptarse a un mundo que demanda calidad, autenticidad y respeto por la naturaleza.

El modelo de economía circular, que surgió del diálogo entre productores y productoras, en el marco de un proceso participativo, mostró que las prácticas sostenibles ya estaban presentes en su quehacer diario, aun sin nombrarlas como tales. La colaboración familiar, el apoyo entre vecinos y la construcción de redes entre comunidades no son ideas nuevas: son formas de resistencia y de esperanza que ahora encuentran, en la posibilidad de una marca colectiva, un camino para fortalecerse y abrir nuevos horizontes.

El proceso artesanal está estrechamente relacionado con personas cuyos rostros y cuerpos dan cuenta de su arduo trabajo y que son quienes dan soporte y energía al círculo, su destreza conocimientos, creatividad, saberes, usos, costumbres y tradiciones, son vitales para que este ciclo conserve su conexión con el pasado, la unicidad del presente y el esmero para la visión hacia el futuro.s

La marca colectiva no es entonces un simple distintivo; es la oportunidad de caminar juntos, de reconocer el valor que cada productor aporta, de cuidar lo que la tierra regala y de sostener una identidad que se construye en cada grano de cacao sembrado, tostado, molido y compartido. Asumir este reto implica seguir innovando, pero sin perder la raíz que da sentido a cada gesto de quienes cultivan el cacao como parte de su vida misma.

Referencias

Aldana Aranda, D. (2008). El papel de la mujer en la pesquería de ostión en Tabasco. *Ciencia, 59*(4), 56-67. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/59_4/PDF/09-MujeresOstion.pdf

Ander-Egg, Ezequiel. (1991). *El taller, una alternativa de renovación pedagógica*. Magisterio del Río de la Plata.

Arias, N. (2024, 21 de septiembre). Sembrando Vida perdió 25% del padrón de beneficiarios en Tabasco. *El Heraldo de Tabasco*. https://oem.com.mx/elheraldodetabasco/local/cuantos-beneficiarios-de-sembrando-vida-hay-en-tabasco-13115345

Arrazate, C.H.A., Fuentes, J. M. V., Rojas, E. C., Méndez, R. A. G., López, A. M., Medina, J. F. A., Esquivez, A. S. y Zaragoza, S. E. (2011). *Diagnóstico del cacao en México*. Universidad Autónoma Chapingo. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232186/Diagnostico_del_cacao_en_mexico.pdf

Broda, J. (2001). Introducción. En J. Broda y F. Báez-Jorge (Coords.), *Cosmovisión, ritual e identidad de los pueblos indígenas de México* (p. 15). Fondo de Cultura Económica.

Castellanos Suárez, V. (2024). Cacaoteros bajo estrés intra y extralaboral: Afrontamiento y autocuidado de varones insertos en la economía circular. En C. A. Olarte Ramos, V. Castellanos Suárez y R. Cornelio Landero (Coords.), *Identidad y Cuidados Masculinos. Vivencias de varones en la economía circular comunitaria* (pp. 47-68). Tirant Humanidades.

Cerdá, E. y Khalilova, A. (2016). Economía circular. En *Economía industrial* (pp. 11-20). Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

Chango, M.E., Ayala, M. y Granda, E.Á. (2025). El cacao ceremonial y sus beneficios en la recuperación del bienestar del ser humano desde la cosmovivencia andina. *Cien-*

cia Latina: Revista Científica Multidisciplinar, *9*(2), 2170-2183. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.17053

De Barros, A. R., Ferreira, F. C. R. G., Ferreira, J. P., De Azevedo Pacheco, P. M., Ambrosoli, S. D. S. y Da Silveira Goldani Pinheiro, A .M. (2022). Chocolate e emoções: A relação entre o consumo de chocolate teor 70% cacau e a ansiedade. *RECIMA21*, *3*(12), e3122419. https://doi.org/10.47820/recima21.v3i12.2419

Dzib Moo, D. L. B., Falcón Jiménez, S. y González Dzib, A. (2018). *Breve diagnóstico de los centros integradores: Caso Tabasco.* https://ru.iiec.unam.mx/4257/1/7-Vol2_Parte1_Eje3_Cap2-015-Dzib-Falcon-Gonzalez.pdf

En Alimentos. (2020). *Tabasco, entre los estados de México que más exporta productos agroindustriales*. https://enalimentos.lat/noticias/1879-tabasco-entre-los-estados-de-mexico-que-mas-exporta-productos-agroindustriales.html

Gobierno del Estado de Tabasco. (2021). *Afinan gobierno e IP agenda sobre economía circular en Tabasco*. https://tabasco.gob.mx/noticias/afinan-gobierno-e-ip-agenda-sobre-economia-circular-en-tabasco

Gobierno del Estado de Tabasco. (2022). *Con recicladora "Planeta", será Tabasco referente mundial en la economía circular.* https://tabasco.gob.mx/noticias/con-recicladora-planeta-sera-tabasco-referente-mundial-en-la-economia-circular

Gobierno del Estado de Tabasco (2024). *Informe sobre la situación económica, los ingresos y egresos públicos del estado de Tabasco.* https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/users/userspftabasco/informe-4to-trimestre-2024_Op.pdf

Gómez, E. H., Morales, J. H., Arrazate, C. H. A., Guillén, G. L., Ramírez, E. R. G., Nápoles, J. R. y Díaz, C. N. (2015). Factores socieconómicos y parasitológicos que limitan la producción del cacao en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, *33*(2), 232-246. https://biblat.unam.mx/en/revista/revista-mexicana-de-fitopatologia/articulo-factores-socieconomicos-y-parasitologicos-que-limitan-la-produccion-del-cacao-en-chiapas-mexico

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Comalcalco, Tabasco.* https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/27/27005.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025, 25 de enero). *Censos Económicos, Tabasco: Información a detalles del sector privado y empresas paraestastales en Tabasco.* https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2025/ce/CE_2024_RO_Tab.pdf

Luján Sáenz, J. C. (2023). El dulce sabor del cultivo de la paz. *Revista Universidad EAFIT*, *57*(178). https://repository.eafit.edu.co/items/ead58cd2-86bd-438e-a99a-814c1547acf2

Martínez-Salvador, L.E y Martínez-Salvador, C. (2020). Innovación social en organizaciones cacaoteras en Tabasco, México: Aproximaciones desde la gobernanza territorial y la participación femenina en la agricultura. *Estudios Sociales: Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional, 30*(55), 2-29. https://doi.org/10.24836/es.v30i55.939

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). (2022).

ONUDI asesorará al estado mexicano de Tabasco en materia de política industrial. https://www.unido.org/news/onudi-asesorara-al-estado-mexicano-de-tabasco-en-materia-de-politica-industrial

Peralta, M., Ortega, A. y Arista, L. (2021, 30 de junio). Tabasco: El estado del presidente es el más beneficiado con Sembrando Vida. *Expansión Política*. https://politica.expansion.mx/estados/2021/06/29/tabasco-el-estado-natal-del-presidente-el-mas-beneficiado-con-sembrando-vida

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C. y Ormazabal, M. (2017). Economía circular: relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (15), 85-95.

Rabelo Ávalos, A.R., Ramos Muñoz, D.E., Díaz Perera, M.A. y Mesa Jurado, A. (2021). El petróleo en Tabasco: Propuesta para una periodización. *Revista Mexicana de Sociología, 83*(1). https://mexicanadesociologia.unam.mx/index.php/v83n1/452-v83n1a5#:~:text=En%201985%20el%20declive%20en,el%20primer%20lugar%20de%20extracci%C3%B3n

Radic, M. A. 2002. *La teoría pura del ceremonial*. Laurea Hispalis.

Rodríguez Luna, M. E. (2012). El taller: Una estrategia para aprender, enseñar e investigar. En S. Soler Castillo (Comp.), *Lenguaje y Educación: Perspectivas metodológicas y teóricas para su estudio* (pp. 13-43). Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2012). *Programa de Desarrollo Forestal Comunitario.* https://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/3927Programa%20Capacitaci%C3%B3n%20T%C3%A9cnicos%20Comunitarios.pdf

Sosa Cabrera, E. (2014). *Agricultura chol en Tacotalpa, Tabasco* [Tesis de Maestría]. El Colegio de la Frontera Sur. https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/1655/1/100000035120_documento.pdf

Weatherford, J. (1998). *La historia del dinero: De la piedra arenisca al ciberespacio*. Andrés Bello. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=136392

10. Sistemas de recirculación: Hacia un modelo de economía circular en la acuicultura

Iván Gallego-Alarcón[1]
Sergio Alcaraz-Ibarra[2]
David García-Mondragón[3]
Gehovana González-Blanco[4]
Boris Miguel López-Rebollar[5]
Carlos Roberto Fonseca[6]
Laura White Olascoaga[7]
Iván Cervantes-Zepeda[8]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.10

Resumen

La acuicultura se ha desarrollado en un contexto de crecientes presiones ambientales y regulatorias, donde la competencia por el agua ha impactado su productividad. Las exigencias sociales y gubernamentales son cada vez mayores, dificultando la obtención de concesiones de uso de agua y endureciendo los trámites en comparación con décadas pasadas. Ante estos desafíos, la economía circular surge como una solución integral mediante la

[1] Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9125-6532
[2] Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2270-5741
[3] Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesor de la UAEMex, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1721-5465
[4] Doctora en Biotecnología. Profesora-investigadora de la UAEMex, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3818-3458
[5] Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6914-0787
[6] Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3377-6564
[7] Doctora en Ciencias Ambientales. Profesora-investigadora de la UAEMex, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9189-3902
[8] Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2859-1223

implementación de sistemas cerrados. Estos permiten la producción de alimentos de alta calidad bajo un esquema sustentable, reduciendo hasta en un 99% el consumo de agua en comparación con los sistemas abiertos. Además, favorecen el aprovechamiento de fuentes alternativas como el agua de lluvia o la proveniente de humedales artificiales. Un problema clave de la acuicultura tradicional es la eutrofización de cuerpos de agua debido a la descarga de residuos sólidos y líquidos. Sin embargo, los sistemas cerrados incorporan estrategias para reutilizar estos desechos como fertilizantes en cultivos agrícolas o nutrientes para otros organismos acuáticos, como en los sistemas acuapónicos. Asimismo, están diseñados con materiales y procesos que garantizan un ciclo operativo continuo. En este sentido, estos sistemas representan un cambio de paradigma en la gestión de los recursos hídricos, promoviendo un modelo basado en la economía circular que garantiza la producción sostenible de alimentos sin comprometer el equilibrio ambiental.

Palabras clave: *sistemas de recirculación acuícola, revalorización de residuos, gestión de recursos, sostenibilidad.*

Introducción

Acuicultura

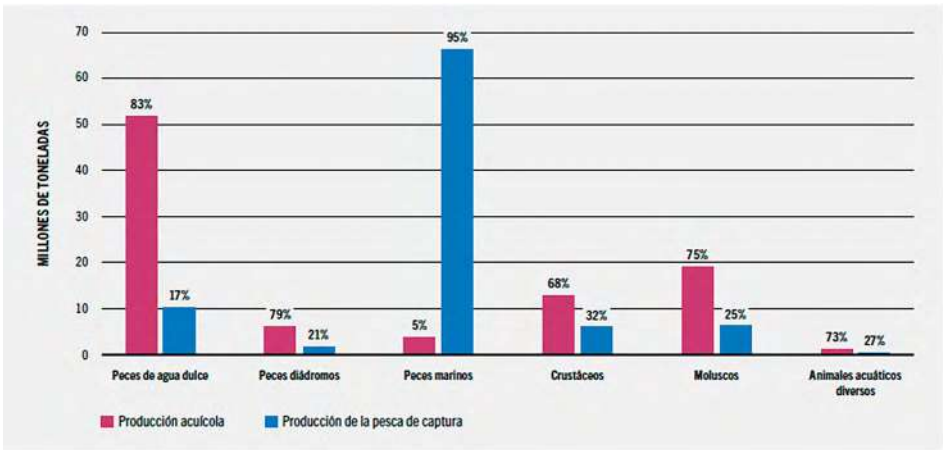
La acuicultura se define como la producción controlada, en condiciones de confinamiento de organismos acuáticos que desarrollan todo o parte de su ciclo de vida en ambientes acuáticos, con el objetivo de obtener biomasa (principalmente carne) o ejemplares para diversos fines de interés humano, como el consumo alimentario, la conservación, la repoblación o el uso ornamental con un enfoque sustentable.

Esta actividad se clasifica en dos grandes ramas: la maricultura, que se refiere al cultivo de especies en ambientes marinos o salobres, y continental o de agua dulce. La acuicultura se practica predominantemente con peces de agua dulce a nivel global. Entre las especies de mayor importancia económica y productiva destacan las carpas *(Cyprinidae),* los salmónidos

(Salmonidae) y las tilapias *(Oreochromis* spp.). En el caso de organismos marinos la producción de camarón blanco *(Litopenaeus vannamei)* representa una de las especies más cultivadas a nivel mundial.

El impacto de la acuicultura es evidente al compararla con la pesca: actualmente, solo los organismos marinos continúan siendo extraídos en mayor volumen mediante pesca. La mayoría de los organismos acuáticos de agua dulce y otras especies acuícolas ya se producen en sistemas controlados (figura 10.1).

Figura 10.1. *Producción pesquera y acuícola por grupos de especies*



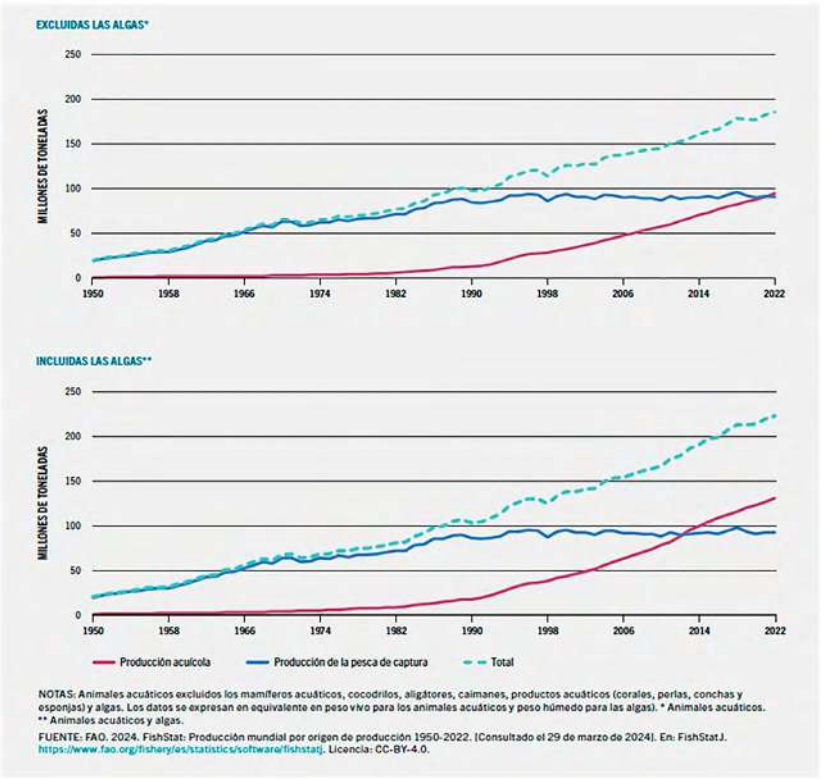
Fuente: FAO (2024).

La acuicultura ha evolucionado como industria durante las últimas cinco décadas, tanto a nivel global como nacional. Entre los años 2000 y 2022, esta actividad presentó una tasa de crecimiento promedio anual del 5.2%. Posterior a la pandemia de covid-19, la acuicultura mundial experimentó un repunte, alcanzando un crecimiento del 7.6%.

La participación de la acuicultura en la producción total de organismos acuáticos ha mostrado un incremento sostenido desde 1990. En el año 2022, se registró una producción acuícola mundial de 94 millones de toneladas (figura 10.2), lo que representó el 51% del total, superando por primera vez a la producción proveniente de la pesca extractiva, que fue de 91 millones de toneladas (49%) (FAO, 2024).

Se estima que aproximadamente 22 millones de personas dependen directamente de la acuicultura como fuente de empleo e ingresos a nivel global. En América Latina, se calcula que alrededor de 800 mil personas están vinculadas laboralmente a esta actividad. En términos de distribución geográfica del empleo acuícola, el continente asiático concentra el 85% del total, seguida por África (10%), América Latina y el Caribe (4%), y un 1% conjunto en América del Norte, Europa y Oceanía (FAO, 2024).

Figura 10.2. *Producción pesquera y acuícola mundial*



Fuente: FAO (2024).

En 2022, México produjo más de 304 mil toneladas de productos derivados de la acuicultura en 2022, lo que representó aproximadamente el 14% de la producción total de organismos acuáticos en el país. El valor

económico de esta producción superó los 20.5 mil millones de pesos. La especie de mayor producción en el país fue el camarón blanco *(Litopenaeus vannamei),* con 192.6 mil toneladas y un valor de 16.1 mil millones de pesos. En la figura 10.3, se muestran otras especies relevantes para el sector acuícola mexicano, tales como la tilapia *(Oreochromis* spp.), el ostión *(Crassostrea* spp.), la carpa *(Cyprinus carpio)* y el atún *(Thunnus* spp.) (Conapesca, 2023).

Figura 10.3. *Producción acuícola y su valor en México para el año 2022*

ESPECIES	VOLUMEN 1/	VALOR
TOTAL	300,207	20,520,333
CAMARÓN	192,638	16,130,130
MOJARRA	58,482	2,229,583
OSTIÓN	29,951	804,560
CARPA	8,083	400,477
ATÚN	5,166	516,592
LOBINA	1,432	110,869
BAGRE	990	60,525
CHARAL	963	38,134
TRUCHA	865	99,009
ORNATO	8	618
LANGOSTINO	5	1,498
OTRAS	1,624	128,338

1/ PESO DESEMBARCADO.
FUENTE: COMISIÓN NACIONAL DE ACUACULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN GENERAL DE PLANEACIÓN, PROGRAMACIÓN Y EVALUACIÓN.
LA SUMA DE LOS PARCIALES PUEDE NO COINCIDIR CON EL TOTAL POR EL REDONDEO DE LAS CIFRAS.

Fuente: Conapesca (2023).

Esta actividad se ha desarrollado en un contexto caracterizado por crecientes presiones ambientales y regulatorias a pesar de los beneficios sociales y económicos que ofrece la acuicultura. En particular, la competencia por el recurso hídrico ha afectado negativamente su productividad. En este escenario, las unidades de producción acuícola (UPA) han encontrado en los sistemas cerrados, y en particular en los sistemas de recirculación acuícola (SRA), una solución integral dentro del marco de la economía circular.

Unidades de producción acuícola (UPA)

La unidad de producción acuícola es la unidad básica de la actividad acuícola, y se refiere al conjunto de estructuras diseñadas para contener agua

y permitir la producción controlada de organismos acuáticos. Estas estructuras pueden incluir estanques, tanques, jaulas, tinas, entre otras, y su propósito principal es mantener a los organismos en condiciones de cautiverio. La elección de la forma, tamaño y material de construcción de estas estructuras depende de diversos factores económicos, técnicos y operacionales.

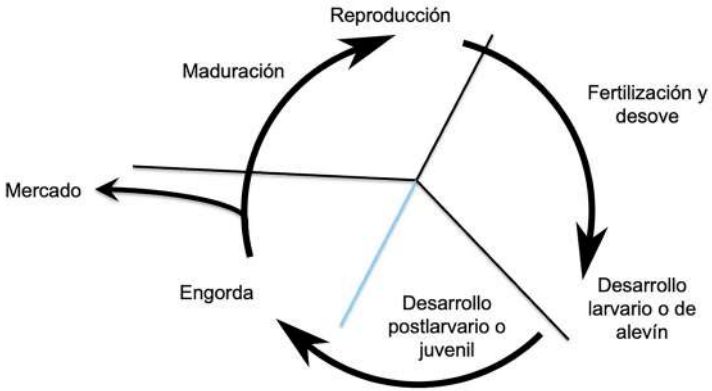
Uno de los factores más relevantes para determinar el tipo de estanques en una UPA es la densidad de producción al final del ciclo, que se refiere a la cantidad de biomasa por unidad de volumen o área. De acuerdo con esta densidad, las UPAs pueden clasificarse en diferentes tipos: extensivas, semiintensivas, intensivas e hiperintensivas. Las UPAs extensivas suelen tener una densidad de producción muy baja y emplean estanques generalmente de tierra, de forma rectangular, con tecnología mínima o nula, baja o nula alimentación externa. En contraste, las UPAs hiperintensivas operan con altas densidades de biomasa, utilizando estanques circulares, generalmente construidos con materiales plásticos como geomembranas, y cuentan con un alto nivel de tecnología.

Otros factores clave que influyen en la configuración de estas unidades incluyen el tipo de agua utilizada (dulce o salada), los organismos acuáticos que se cultivan (como ostiones, camarones, peces, anfibios, reptiles acuáticos, entre otros), el ciclo de vida de los organismos (ciclo completo, crías, engorda), y el flujo de agua en el sistema, que puede ser abierto, semicerrado o cerrado.

El ciclo de vida de los organismos acuáticos (figura 10.4) determina las diferentes zonas dentro de una unidad de producción acuícola (UPA). En general, estas unidades se dividen en cinco áreas funcionales: reproducción, larvario y cría de alevín, preengorda, engorda, y sacrificio o rastro.

A. *Reproducción.* En esta área se encuentran los animales adultos, los cuales se mantienen para gestionar la reproducción, ya sea de manera natural o artificial, con el fin de obtener la materia prima para la producción, como larvas o alevines de la especie cultivada. La infraestructura en esta fase varía según la especie, pudiendo ir desde estanques rústicos hasta instalaciones especializadas construidas en concreto o fibra de vidrio.

Figura 10.4. *Ciclo de vida en cautiverio de organismos acuícolas*



Fuente: elaboración propia.

B. *Larvario y cría de alevín.* En esta zona se gestionan los organismos en su etapa inicial, desde los huevos hasta que los alevines eclosionan y alcanzan un crecimiento fisiológico que les permite aceptar alimento de manera externa. En esta fase es común el uso de alimentos balanceados específicos para cada especie, promoviendo el desarrollo adecuado de los organismos.
C. *Preengorda.* En esta área se mantienen los organismos en densidades altas dentro de estanques que varían desde rústicos hasta canales de corriente rápida y estanques de concreto. Las dimensiones de estos estanques son menores en comparación con los destinados a la engorda. La función de esta fase es regular el peso y crecimiento de los animales, facilitar la detección temprana de enfermedades y, en ciertos cultivos (como en ranas, truchas o carpas), permitir la separación por tallas.
D. *Engorda.* La infraestructura en esta fase es similar a la de la preengorda, pero con instalaciones de mayor tamaño, que pueden variar entre 0.001 ha hasta 100 ha. Los animales permanecen en esta etapa hasta alcanzar una talla comercial, listos para ser enviados al mercado.
E. *Sacrificio o rastro.* Algunas UPAS cuentan con instalaciones para el sacrificio de los animales, con el fin de garantizar que los productos lleguen al mercado sin riesgos de contaminación. Estas instalacio-

nes deben cumplir con las normas de higiene y las regulaciones sobre el bienestar animal, para asegurar la seguridad alimentaria y el cumplimiento de los estándares sanitarios.

Flujo de agua en las UPA

El tipo de flujo de agua en una UPA es determinante para la clasificación del sistema utilizado. Tradicionalmente, se emplea un flujo abierto, donde el agua entra a la unidad, circula por los estanques y luego se descarga en un cuerpo de agua cercano. Este sistema es común en la mayoría de las UPAS, que a menudo utilizan bombas de agua subterránea, o dependen de la gravedad para permitir que el agua fluya desde áreas elevadas.

Por otro lado, las UPAS que operan con flujo cerrado emplean solo la cantidad de agua necesaria para llenar los estanques y los sistemas de filtración. El agua no se descarga, lo que implica una descarga casi nula al medio ambiente. Los sistemas de flujo cerrado ofrecen varias ventajas, como bajos volúmenes de agua, uso eficiente del espacio, reducción de predadores, disminución del riesgo de enfermedades, el control de parámetros críticos como oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal total (NAT) y sólidos suspendidos totales (SST). Sin embargo, presentan desventajas, tales como dependencia total de energía eléctrica, altos costos operativos, la necesidad de mano de obra calificada y el alto costo tecnológico.

Tipos comunes de sistemas de flujo cerrado

Los sistemas más comunes de flujo cerrado utilizados en las UPAS son (1) Biofloc, (2) acuaponía y (3) sistemas de recirculación acuícola (SRA). El sistema Biofloc se basa en comunidades microbianas formadas por flóculos que, bajo condiciones de recirculación constante de agua, alta oxigenación y suplementación con fuentes de carbono, permiten un control eficiente de la calidad del agua a través de procesos naturales (Hernández-Mancipe et al., 2019). La acuaponía integra la acuicultura y la hidroponía, donde los

nutrientes derivados de los desechos de los peces se utilizan para fomentar el crecimiento de plantas que fijan nitratos (Flores-Aguilar et al., 2020). Por último, los Sistemas de Recirculación Acuícola (SRA) consisten en sistemas donde el agua de los estanques pasa por un proceso de tratamiento antes de ser recirculada a los mismos estanques.

Sistemas de recirculación acuícola (SRA)

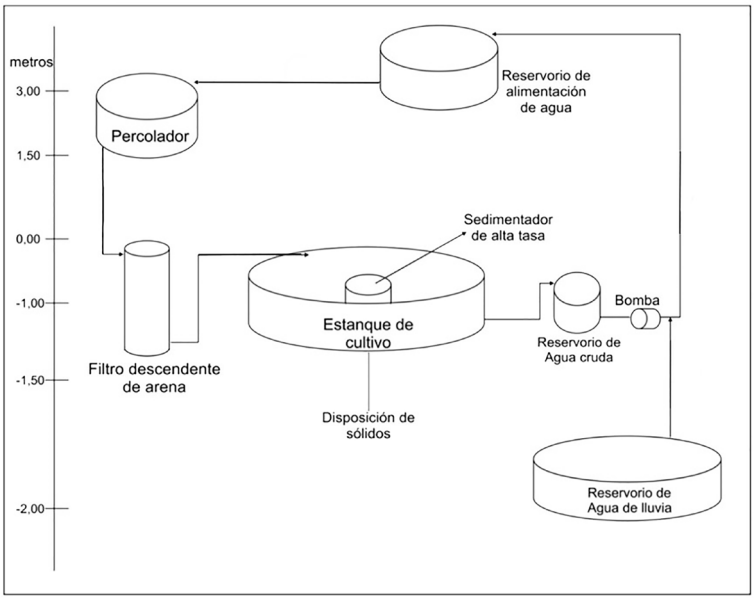
Los sistemas cerrados de recirculación acuícola han sido propuestos como una solución viable frente a las crecientes presiones ambientales, así como a las demandas sociales y regulatorias. Esta tecnología permite una reducción en el consumo de agua de hasta un 99% en comparación con los sistemas tradicionales de flujo abierto, y requiere menos del 1% del área utilizada en la acuicultura convencional (Timmons et al., 2009).

Los SRA ofrecen un control integral sobre todos los parámetros críticos del entorno de cultivo (figura 10.5), lo que posibilita mantener de forma constante la calidad y la disponibilidad de los productos durante todo el año. Esta capacidad de control otorga al operador la posibilidad de gestionar de manera precisa las condiciones ambientales del sistema productivo. No obstante, esta ventaja también implica que el operador asume la responsabilidad total sobre todos los factores que afectan tanto la producción como el bienestar de los organismos cultivados (Tidwell, 2012).

El agua no se desperdicia en los SRA, sino que se reutiliza una y otra vez. Para mantenerla en condiciones óptimas continuamente se oxigena mediante aireadores o incluso oxígeno puro, y al mismo tiempo se eliminan los desechos que generan los peces. Cuando se usa solo aire, la cantidad de peces que puede criarse se limita a unos 40 kg/m^3. Sin embargo, si se emplea oxígeno puro (oxigenación) esa cifra puede triplicarse, alcanzando hasta 120 kg/m^3 (Timmons et al., 2009).

Estos sistemas usan filtros mecánicos o sedimentadores (gravedad) que retiran los residuos sólidos para limpiar el agua. Después, entran en acción bacterias nitrificantes, que transforman compuestos tóxicos como el nitrógeno amoniacal total (NAT) en otros menos dañinos, como los nitratos. Estas bacterias, que también se usan en estanques, aquí se cultivan

Figura 10.5. *Esquema de un SRA para la producción de trucha arcoíris*



Fuente: Gallego (2010).

en grandes cantidades dentro de dispositivos llamados biofiltros (Timmons et al., 2009).

Los biofiltros están diseñados para ofrecer a las bacterias superficies donde puedan adherirse y crecer. Para ello, se llenan con materiales conocidos como "medios de soporte", que no solo aumentan la superficie disponible para el crecimiento bacteriano, sino que también permiten que el agua circule con facilidad. Esto es clave, ya que el flujo constante de agua ayuda a alimentar a las bacterias con los nutrientes originados en los estanques de peces y facilita que excreten sustancias mucho menos tóxicas (Timmons et al., 2009).

Los principales insumos empleados para la producción acuícola son el agua, los organismos acuáticos, el alimento balanceado y el oxígeno disuelto en estos sistemas. Como resultado del proceso productivo, se generan diversos residuos, entre los que destacan: lodos compuestos por alimento no consumido y materia fecal, dióxido de carbono (CO_2), compuestos nitrogenados como amonio/amoníaco (NH_4^+/NH_3, también conocidos

como nitrógeno amoniacal total [NAT]), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-), así como agua residual con carga orgánica y nutrientes, y organismos acuáticos muertos.

Dado que estos sistemas permiten un alto grado de control sobre todos los flujos y residuos de entrada y salida, el aprovechamiento y la valorización de los residuos generados resulta altamente viable dentro del enfoque de la economía circular.

Economía circular y sostenibilidad en la acuicultura

La economía circular propone reducir, reutilizar y reciclar recursos con el objetivo de minimizar los residuos y maximizar el valor de los materiales. A diferencia del modelo lineal de "extraer, producir y desechar", este enfoque promueve un uso más eficiente y sostenible de los recursos, incluido el agua.

Este concepto se relaciona estrechamente con los sistemas de producción, ya que implica la gestión integral de todos los insumos utilizados en los procesos productivos. En el contexto acuícola, la economía circular busca preservar el valor del agua, los alimentos y los organismos cultivados a lo largo del ciclo de producción, revalorizando los residuos.

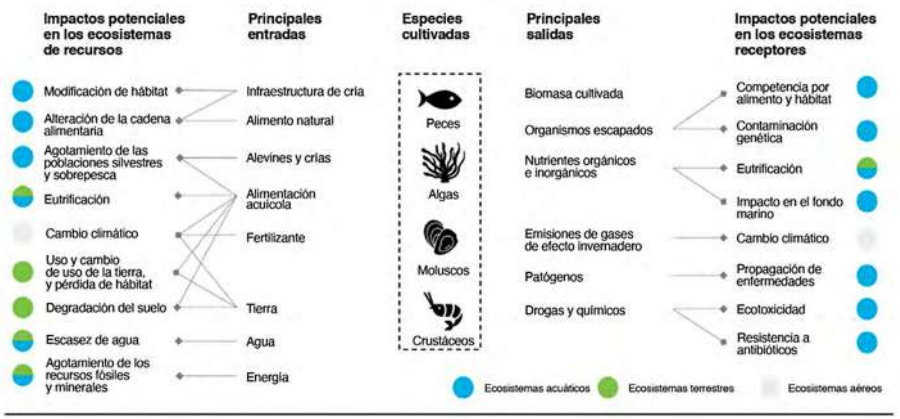
La adopción de principios de economía circular en la acuicultura representa una transición clave: de ser una actividad intensiva y de rápido crecimiento a convertirse en un sector sostenible. Esta transformación contribuye al cumplimiento de los objetivos climáticos globales y a la conservación de los recursos naturales, al tiempo que genera empleo y alimentos de alta calidad mediante prácticas socialmente responsables, económicamente viables y ambientalmente sostenibles (Campanati et al., 2021).

La acuicultura ha sido reconocida como el sector agroalimentario con mayor crecimiento en las últimas décadas (FAO, 2020). En este contexto, se posiciona como una actividad estratégica con un rol fundamental en la seguridad alimentaria, el desarrollo económico y la protección ambiental. Sin embargo, su expansión también implica una mayor presión sobre los recursos esenciales, como el agua y el alimento, lo que exige el desarrollo e

implementación de procesos, tecnologías y prácticas sostenibles (Campanati et al., 2021).

Los sistemas acuícolas impactan tanto a los ecosistemas proveedores de recursos (entradas) como a los receptores de residuos (salidas) (figura 10.6). La magnitud de estos efectos varía según el tipo de sistema alimentado o no, intensivo o extensivo y depende en gran medida de los insumos utilizados. Por ejemplo, el uso de alimentos balanceados de alta calidad en la cría de peces y crustáceos puede reducir las emisiones de nutrientes y alterar el uso del suelo, afectando ecosistemas cercanos y distantes (Chary et al., 2024).

Figura 10.*6. Principales entradas y salidas de los sistemas de acuicultura y sus impactos ambientales sobre recursos y ecosistemas receptores*



Fuente: modificado de Chary et al. (2024).

Es fundamental identificar y cuantificar los principales residuos y subproductos generados en los diferentes sistemas de cultivo para avanzar hacia una acuicultura verdaderamente sostenible. Esta información permitirá tomar decisiones informadas sobre su recuperación y valorización, incluyendo el reciclaje de nutrientes mediante biofiltros, bioacumulación y sistemas multitróficos (Campanati et al., 2021).

Ante esta realidad, es indispensable identificar los impactos y oportunidades dentro del sector acuícola para maximizar sus beneficios y reducir sus efectos negativos.

Gestión sostenible del agua en acuicultura

El agua es un recurso esencial para la vida y cada vez más vulnerable debido al cambio climático, la contaminación y la sobreexplotación. En la acuicultura, su uso eficiente es crucial para garantizar la viabilidad y sostenibilidad del sector.

La economía circular aplicada al recurso hídrico promueve cerrar el ciclo del agua: maximizar su uso, reducir el desperdicio y reutilizarla múltiples veces. Este enfoque contrasta con el modelo lineal tradicional de extracción, uso y eliminación. Su implementación en la acuicultura permite mantener el valor del agua por más tiempo y disminuir la presión sobre fuentes convencionales, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Martínez et al., 2022).

La optimización del recurso hídrico puede lograrse mediante prácticas como la eliminación del recambio, el reúso de efluentes dentro del mismo sistema o su utilización en el cultivo de otras especies animales o vegetales (Martínez et al., 2022). Estas estrategias no solo favorecen la eficiencia del uso del agua, sino que también apoyan la resiliencia frente a crisis hídricas y contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Banco Mundial, 2019; Rodríguez et al., 2020).

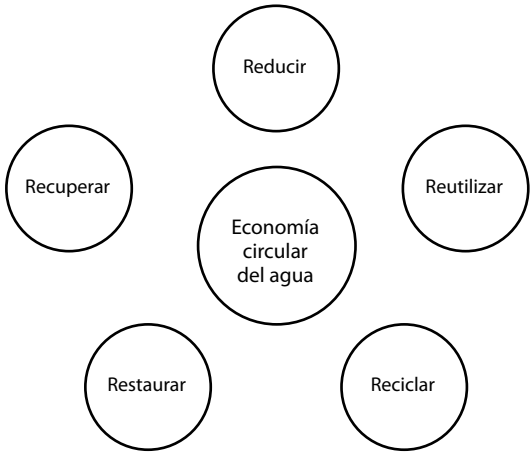
Las aguas residuales acuícolas deben considerarse un recurso valioso desde esta perspectiva (WWAP, 2017). La figura 10.7 muestra los principios fundamentales de la economía circular del agua.

Bajo este paradigma, se comprende: reducir el consumo y las pérdidas de agua en los procesos; eeutilizar las aguas residuales, asegurando su calidad para la acuicultura; reciclar el agua dentro del sistema productivo aumentando su eficiencia; restaurar la calidad del agua para proteger la salud y los ecosistemas acuáticos, y; recuperar el agua para otros usos beneficiosos.

Además, es esencial fomentar el uso de fuentes alternativas como el agua de lluvia o aguas residuales tratadas, lo cual contribuye a disminuir la presión sobre acuíferos y cuerpos superficiales (Rivera y Donoso, 2020).

La reutilización del agua también permite recuperar subproductos valiosos que, en sistemas abiertos, se pierden. Por ejemplo, los lodos forma-

Figura 10.7. *Principios fundamentales de la economía circular en agua*



Fuente: elaboración propia con información de Rivera y Donoso (2020).

dos por restos de alimento y desechos de peces pueden convertirse en biogás o fertilizantes. Los nutrientes disueltos, como el nitrógeno y fósforo, son útiles en cultivos integrados como los sistemas acuapónicos.

Alimentación sostenible en acuicultura.

La alimentación para especies acuícolas representa una de las principales áreas de mejora para lograr una acuicultura sostenible. Actualmente, los alimentos se basan en harina y aceite de pescado, insumos de alto valor nutricional pero cuestionados por su origen: especies marinas de bajo valor comercial capturadas exclusivamente para este fin, lo que puede comprometer la biodiversidad y el equilibrio ecológico (Bandara, 2018; Tacon y Metian, 2008; Tesser y Torres, 2022). Asimismo, existe una competencia por el uso de diversas materias primas requeridas para la elaboración de alimentos balanceados acuícolas, debido a su demanda en otras actividades, como el consumo humano.

Debido a lo anterior, este modelo no es sostenible a largo plazo, ya que ningún recurso pesquero o agrícola podría abastecer la creciente demanda global. Por ello, es necesario desarrollar alternativas de dietas sostenibles y

accesibles. El uso de harina de pescado ha disminuido progresivamente en países europeos, por ejemplo, siendo reemplazada por ingredientes vegetales. Sin embargo, estos también pueden generar controversias, al competir con el consumo humano directo. En este contexto, los subproductos agrícolas representan una opción viable: son abundantes, económicos, y su uso presenta menor competencia con la alimentación humana.

El aprovechamiento de residuos orgánicos provenientes de hogares, industrias y agricultura, comúnmente desaprovechados y mal gestionados, también puede aportar soluciones. En varios países se han implementado modelos de economía circular que reutilizan estos residuos para producir subproductos útiles en otras industrias.

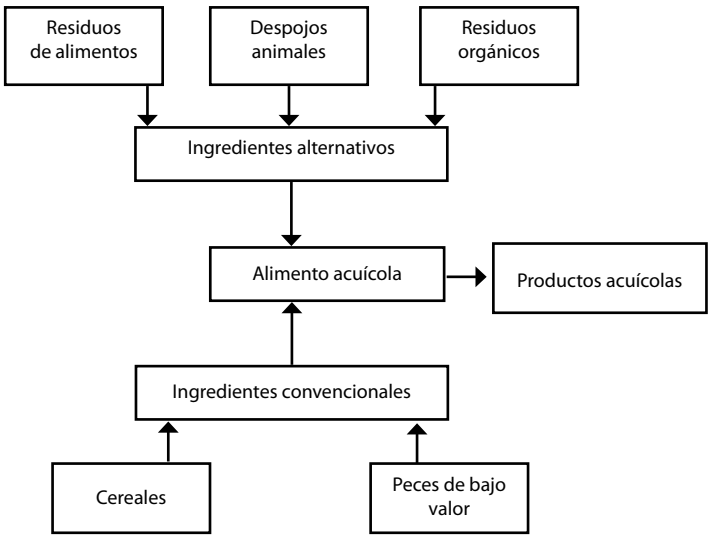
La conversión de residuos alimentarios en alimentos balanceados para animales es una práctica consolidada en muchos lugares (Cheng, 2016), y su extensión a la acuicultura podría reducir costos de producción, disminuir la presión ambiental y mitigar el cambio climático (Akankali, 2015).

Se han identificado otras fuentes proteicas sostenibles, aunque la harina y el aceite de pescado siguen siendo insumos clave por su alto contenido proteico (Castillo et al., 2019). Subproductos de las industrias ganadera, avícola y pesquera pueden ser aprovechados, especialmente considerando que hasta el 75% del peso seco de un pez está compuesto por proteínas (Portz y Furuya, 2013). Por ejemplo, la sangre animal contiene hasta un 90% de proteínas, lo que representa una alternativa valiosa para disminuir la dependencia de recursos pesqueros (figura 10.8).

Valorización de residuos acuícolas

Los residuos generados por la industria acuícola como cabezas, vísceras, espinas, piel y aletas son ricos en compuestos bioactivos con alto valor agregado (Ghosh et al., 2016). Tradicionalmente desechados, estos subproductos pueden ser transformados en ingredientes para alimentos, cosméticos, fertilizantes y biomateriales (Smichi et al., 2016; Ozyurt et al., 2017). Así mismo, en diversos países la piel de pescado, tras un proceso de curtido, se transforma en un biomaterial resistente, idóneo para la manufactura de bienes como artículos de marroquinería (bolsas, cinturones, carteras), ac-

Figura 10.8. *Insumos convencionales y alternativos del alimento acuícola*



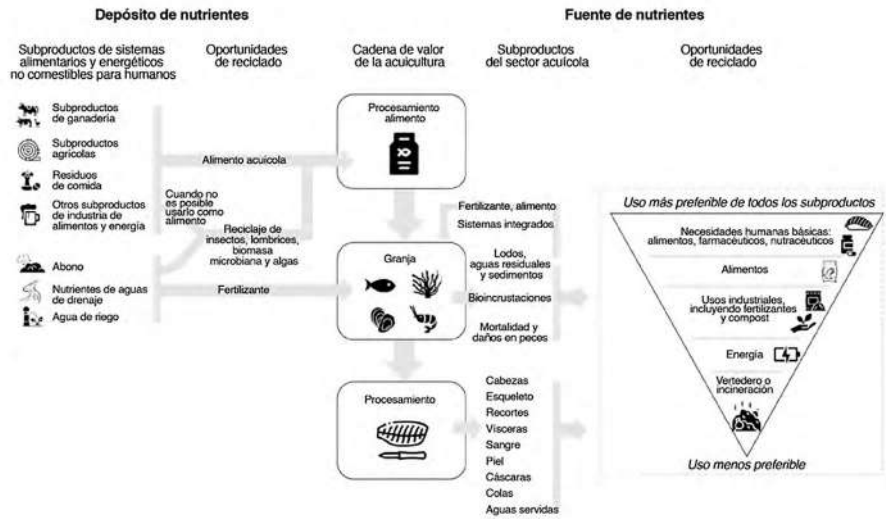
Fuente: elaboración propia.

cesorios de moda (collares, aretes, correas de reloj), y aplicaciones textiles y los huesos son utilizados para la elaboración de artesanías, contribuyendo al desarrollo de cadenas de valor sostenibles, las especies más utilizadas son: la corvina, el salmón y la tilapia, siendo este último por la dureza de su piel y tamaño de escamas el más utilizado (Duraisamy et al., 2016; Santos-Correa et al., 2021).

La valorización de residuos generados por la industria acuícola ha avanzado más allá de la producción convencional de harina y aceite de pescado. Hoy se exploran aplicaciones innovadoras alineadas con los principios de la economía circular como: síntesis de ácidos grasos omega-3 para alimentos funcionales y suplementos (Ghaly et al., 2013) tanto para animales como humanos; la producción de ensilados para alimentación animal (Ramírez-Ramírez et al., 2020); la generación de bioenergía (biogás y biodiésel) (Torres, 2024) y en la medicina como injertos de piel (Gómez et al., 2023).

La valorización integral de estos residuos no solo reduce los impactos ambientales negativos (figura 10.9), sino que también promueve la innovación, fortalece las economías locales, genera empleo y apoya el desarro-

Figura 10.9. *Oportunidades de reciclaje en la cadena de valor de la acuicultura para subproductos del sistema alimentario y en otros sectores para subproductos de la acuicultura*



Fuente: modificado de Chary et al. (2024).

llo sostenible de comunidades pesqueras, en armonía con la conservación de los ecosistemas costeros y marinos.

Debe seguirse una jerarquía de recuperación de biomasa al reciclar subproductos del sistema alimentario a la cadena de valor en la acuicultura (lado izquierdo de la figura) y al reciclar subproductos de la acuicultura (lado derecho de la figura), para evitar que ingredientes aptos para el consumo humano terminen siendo utilizados como alimento para animales o fertilizante en sistemas acuícolas (Chary et al., 2024).

Conclusión

Si bien la acuicultura es una actividad con alto potencial de desarrollo, la gestión de los recursos y residuos representa una oportunidad clave para su sostenibilidad. Este potencial puede aprovecharse mediante el uso de sistemas de recirculación que optimicen el uso del agua y maximicen su capacidad productiva, aplicando los principios fundamentales de la economía circular. Asimismo, la implementación de tecnologías para la revalorización

de los residuos generados permite reemplazar el modelo lineal de producción, fortaleciendo así a la acuicultura como una actividad sostenible.

La transformación del modelo acuícola tradicional hacia uno basado en la economía circular no solo es necesaria, sino posible. Los SRA permiten avanzar hacia un paradigma más resiliente, eficiente y equitativo, donde la producción de alimentos acuáticos contribuya al bienestar humano sin comprometer la salud de los ecosistemas. Para lograrlo, será indispensable articular esfuerzos entre el gobierno, la academia, el sector productivo y la sociedad civil.

Referencias

Akankali, J. A. y Nwafili, S. A. (2015). Management of organic waste impacts on the environment: Utilization as fish feed. *International Journal of Development and Sustainability, 4*(5), 513-528. https://www.isdsnet.com/ijds

Bandara, T. (2018). Alternative feed ingredients in aquaculture: Opportunities and challenges. *Journal of Entomology and Zoology Studies, 6*(2), 3087-3094.

Banco Mundial. (2019). *Efficient and effective management of water resource recovery facilities.* https://www.worldbank.org

Campanati, C., Willer, D., Schubert, J. y Aldridge, D. (2021). Sustainable intensification of aquaculture through nutrient recycling and circular economies: More fish, less waste, blue growth. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*. https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1897520

Castillo, G. W. E., Sánchez, S. H. A. y Ochoa, M. G. M. (2019). Evaluación del ensilado de residuos de pescado y de cabeza de langostino fermentado con *Lactobacillus fermentus* aislado de cerdo. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú, 30*(4), 1456-1469. https://doi.org/10.15381/rivep.v30i4.17165

Chary, K., Riel, A., Muscat, A. et al. (2024). Transforming sustainable aquaculture by applying circularity principles. *Reviews in Aquaculture, 16*(2), 656-673. https://doi.org/10.1111/raq.12860

Cheng, J. Y. K. y Lo, I. M. C. (2016). Investigation of the available technologies and their feasibility for the conversion of food waste into fish feed in Hong Kong. *Environmental Science and Pollution Research, 23,* 7169-7177. https://doi.org/10.1007/s11356-015-4668-3

Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (Conapesca). (2023). *Anuario estadístico de acuacultura y pesca 2023.*

Duraisamy, R., Shamena, S. y Abiyu, B. (2016). A review of bio-tanning materials for processing of fish skin into leather. *International Journal of Engineering Trends and Technology, 39*(1), 10-20.

Flores-Aguilar, P., García-Trejo, J. F. y Martínez-Guido S. I. (2020) Acuaponía: Una alternativa versatíl e integral en la producción de alimentos para el entorno mexicano. *Digital Ciencia, 13*(1), 43-53.

Gallego A. I. (2010). *Evaluación y modelación de un tren de tratamiento de agua residual acuícola con recirculación y del cultivo de trucha arco iris alimentado por cosecha pluvial* [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma del Estado de México. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3720.1761

Ghaly, A. E., Ramakrishnan, V. V., Brooks, M. S., Budge, S. M. y Dave, D. (2013). Fish processing wastes as a potential source of proteins, amino acids and oils: A critical review. *Journal of Microbial and Biochemical Technology, 5*(4), 107-129. https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000110

Ghosh, P. R., Fawcett, D., Sharma, S. B. y Poinern, G. E. J. (2016). Progress towards sustainable utilization and management of food wastes in the global economy. *International Journal of Food Science,* 1-22. https://downloads.hindawi.com/journals/ijfs/2016/3563478.pdf

Gómez, L. A., González-Sierra, K. T., Carvajalino-Gutiérrez, Y. A. y Cortés-Amaya, S. S. (2023). Xenoinjertos de piel de tilapia en quemaduras cutáneas: Una revisión exploratoria. *Cirugía Plástica Ibero-Latinoamericana, 49*(3), 309-314. https://doi.org/10.4321/s0376-78922023000300014

Hernández-Mancipe L. E., Lodoño-Velez J. I., Hernández-García K. A. y Torres-Hernández L. C. (2019). Los sistemas biofloc: Una estrategia eficiente de la producción acuícola. *Medicina Veterinaria y Zootecnia, 14*(1), 70-99.

Martínez, L. R., Martínez Porchas, M. M. P., Robles Porchas, G. R. y Garibay Valdez, E. (2022). Alternativas de acuacultura sostenible: Aspectos nutricionales. *Avances en Nutrición Acuícola, 1*(1), 245-262. https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/369

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020.* Fisheries and Aquaculture Department. https://www.fao.org/publications/sofia/2020/en/

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2024). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024: La transformación azul en acción.* https://doi.org/10.4060/cd0683es

Ozyurt, G., Boga, M., Uçar, Y., Boga, E. K. y Polat, A. (2017). Chemical, bioactive properties and in vitro digestibility of spray-dried fish silages: Comparison of two discard fish *(Equulites klunzingeri* and *Carassius gibelio)* silages. *Aquaculture Nutrition,* 1-8. https://doi.org/10.1111/anu.12636

Portz, L. y Furuya, W. M. (2013). Energia, proteína e aminoácidos. In D. Fracalossi y J. Cyrino (Eds.), *Nutriaqua: Nutrição e alimentação de espécies de interesse para a aquicultura brasileira* (pp. 65-78). Sociedade Brasileira de Aquacultura e Biologia Aquática.

Santos-Correa, S., de Souza, L., Chimbida, J., Franco, M., Matiucci, M., Mesquita, D., Rodríguez de Souza, M., Feiden, A. y Silva da Olivera, J. (2021). Avaliação mecânica,

morfológica e fisicoquímica, de couros de corvina, pescada amarela e tilápia. *Research, Society and Development, 10*(15), 1-15.

Ramírez-Ramírez, J., Loya-Olguín, J., Ulloa, J., Rosas-Ulloa, P., Gutiérrez-Leyva, R. y Silva-Carrillo, Y. (2020). Aprovechamiento de desechos de pescado y cáscara de piña para producir ensilado biológico. *Abanico Veterinario, 10,* e116. https://doi.org/10.21929/abavet2020.29

Rivera Bravo, D. y Donoso, G. (2020). *Desafíos del reúso de aguas residuales tratadas en Chile*.

Rodríguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D. y Saltiel, G. (2020). *De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe*.

Smichi, N., Kharrat, N., Achouri, N., Gargouri, Y., Miled, N. y Fendri, A. (2016). Physico-chemical characterization and nutritional quality of fish by-products: *In vitro* oils digestibility and synthesis of flavour esters. *Journal of Food Processing & Technology, 7*(7), 602. https://www.longdom.org/archive/jfpt-volume-7-issue-7-year-2016.html

Tacon, A. G. J. y Metian, M. (2008). Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects. *Aquaculture, 285*(1-4), 146-158. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.015

Tesser, M. y Torres Rosas, V. (2022). Uso de alimentos no convencionales en acuicultura: Estudios realizados en la Universidad Federal de Rio Grande – FURG. *Avances en Nutrición Acuícola, 1*(1), 415-431. https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/387

Tidwell, H. J. (2012). *Aquaculture production systems.* Wiley-Blackwell.

Timmons, B. M, Ebeling M. J. y Piedrahita H. R. (2009). *Acuicultura en sistemas de recirculación Cayuga Aqua Ventures*. Ithaca.

Torres, E. (2024). La transformación de los residuos, una clave para la producción de energía. *Ambiociencias,* 93-110. https://doi.org/10.18002/ambioc.i21.8186

United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2017: Aguas residuales, el recurso desaprovechado.* UNESCO.

11. Turismo circular: Un enfoque integral hacia la sostenibilidad y la innovación en la industria turística

Violena Hubenova Nencheva[1]
Mauricio Morales González[2]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.11

Resumen

En la actualidad, el turismo representa un sector clave para la economía de los países, y su crecimiento constante lo ha convertido en una actividad cada vez más masiva. Este incremento hace imprescindible la implementación de medidas y prácticas sostenibles. Este artículo aborda el concepto emergente del turismo circular, explorando su potencial para transformar la industria turística mediante la integración de prácticas sostenibles, la economía circular y modelos de negocio innovadores. Se destaca cómo el turismo circular influye en múltiples ámbitos, como el económico, social, político, cultural y ambiental, presentando un enfoque integral que abarca cada una de estas dimensiones. A través de una metodología mixta se realiza un análisis comparativo, se examinan las estrategias actuales de pequeñas y medianas empresas y destinos turísticos que ya implementan iniciativas circulares. Utilizando datos estadísticos y predicciones basadas en tendencias actuales, se presenta una visión de futuro del turismo circular, ofreciendo recomendaciones prácticas sobre cómo optimizar recursos, reducir desperdicios y generar valor tanto ambiental como económico.

Palabras clave: *turismo, economía circular, sostenibilidad, México.*

[1] Doctora en Economía. Docente en la Universidad Autónoma de Querétaro, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0904-7281
[2] Ingeniero en Software. Docente en la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5455-1799

Introducción

La transición hacia modelos de desarrollo más sostenibles ha cobrado relevancia en diversos sectores económicos, especialmente en aquellos con un alto impacto sobre los recursos naturales y el medio ambiente, como el turismo. El actual modelo económico lineal, basado en la extracción, producción, consumo y desecho de recursos, ha demostrado ser insostenible a largo plazo, generando impactos negativos tanto en los ecosistemas como en las economías locales. En respuesta a estos desafíos, ha surgido la economía circular como una estrategia clave para promover la eficiencia en el uso de recursos, la reducción de residuos y la generación de valor mediante procesos regenerativos y restaurativos, en alineación con los principios del desarrollo sostenible.

En este contexto, el sector turístico mexicano, que representa una parte significativa del producto interno bruto (PIB) del país y enfrenta desafíos relacionados con la gestión de los recursos naturales, los residuos y las emisiones, está bajo una presión creciente para adoptar prácticas más sostenibles. Sin embargo, la adopción de la economía circular en este sector aún se encuentra en una etapa incipiente, lo que representa una oportunidad para estudiar su integración y evaluar su impacto potencial.

Este estudio plantea la hipótesis de que la implementación de los principios de la economía circular en el sector turístico mexicano puede mejorar significativamente la sostenibilidad de las operaciones y contribuir a la competitividad del sector, tanto a nivel nacional como internacional. El objetivo principal de este artículo es analizar el grado de implementación de prácticas circulares en 55 empresas turísticas en México, utilizando una escala circular que evalúa tres aspectos clave: impacto ambiental, inversión en sostenibilidad e implementación de prácticas circulares.

La metodología empleada consiste en una evaluación cuantitativa, en la que las empresas son clasificadas en diferentes niveles de sostenibilidad según los resultados obtenidos. Esta metodología permite identificar áreas de oportunidad para la mejora y proporciona un marco para la formulación de recomendaciones estratégicas orientadas a optimizar las prácticas circulares en el sector. Los resultados de este análisis tienen implicaciones

directas en la reconfiguración de las estrategias de gestión dentro del sector turístico mexicano, lo que sugiere que la adopción de la economía circular podría ser un motor clave en la transición hacia modelos de negocio más sostenibles y resilientes.

Este estudio se enmarca dentro del desafío global de la sostenibilidad y la necesidad de reorientar los sectores estratégicos hacia un modelo económico que no solo minimice los impactos ambientales negativos, sino que también promueva la regeneración de recursos y la creación de valor compartido. La economía circular, por lo tanto, representa una oportunidad para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, aumentar la competitividad y contribuir al desarrollo sostenible del sector turístico en México.

Marco teórico

Economía circular

Tomando inspiración del modelo cíclico de la naturaleza, la economía circular es un sistema de aprovechamiento de recursos —un modelo de producción y consumo que minimiza los residuos. Trae beneficios al medio ambiente, a la economía y a todos nosotros. La economía circular es un modelo orientado a extender el ciclo de vida de los productos. En la práctica, esto significa maximizar el compartir, prestar, reutilizar, reparar y reciclar los materiales y productos existentes. Este concepto aboga por el uso de materiales biodegradables en la producción de bienes de consumo siempre que sea posible, para que puedan regresar a la naturaleza sin dañar el medio ambiente al final de su ciclo de vida. Cuando no es factible el uso de materiales ecológicos, el objetivo es alargar la vida útil de los productos en producción. Si esto tampoco es posible, el reciclaje debe realizarse de manera ambientalmente responsable.

Por definición, la economía circular es restaurativa y regenerativa, con el objetivo de crear productos, elementos y recursos que mantengan su utilidad y valor en todo momento. Otra definición proviene de la Agencia Europea de Medio Ambiente, que señala:

> Esencialmente, la economía circular representa una alternativa fundamental al modelo económico lineal actualmente dominante. Este modelo lineal se basa en la suposición de que los recursos naturales están disponibles fácilmente, son abundantes, fáciles de obtener y baratos. Sin embargo, no es sostenible a lo largo del tiempo y, en algunos casos, supera los límites del planeta.

La economía circular es la intersección de los aspectos ambientales y económicos. El sistema lineal de nuestra economía (extracción, producción, consumo y desecho) ha llegado a sus límites. Por ello, la economía circular ofrece un nuevo modelo social que utiliza y optimiza los flujos de materiales, energía y residuos, con la meta de lograr una eficiencia en el uso de los recursos. La economía circular también es un impulsor del empleo. El sector de gestión de residuos genera miles de empleos. En el contexto de escasez de recursos y la fluctuación en los costos de las materias primas, la economía circular contribuye a la seguridad del suministro y a la reindustrialización de las naciones. Entre los elementos clave de la economía circular están los procesos de producción y los planes de reutilización de recursos, el reciclaje, el aumento de la eficiencia productiva y el consumo sostenible. Además de la reducción de residuos, también ayuda a ahorrar energía y busca prevenir daños irreversibles causados por el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la contaminación del aire, suelo y agua debido al uso excesivo de recursos que excede la capacidad de renovación de la Tierra.

A diferencia de otros modelos económicos, donde el aspecto económico domina sobre el social o ambiental, la economía circular conduce a mejoras significativas en conjunto tanto para las empresas como para los consumidores. Las empresas que han adoptado este sistema demuestran que reutilizar recursos es mucho más rentable que crearlos desde cero. Como resultado, los costos de producción disminuyen, lo que lleva a precios de venta más bajos, beneficiando a los consumidores no solo económicamente, sino también social y ambientalmente. El desarrollo de la economía circular debería ayudar a reducir el consumo de recursos, minimizar la producción de residuos y limitar el uso de energía. También debería contribuir a la reorientación productiva de los países. Además de sus beneficios ambientales, este nuevo modelo económico crea riqueza y empleo (incluido

dentro de la economía social) en los territorios nacionales, asegurando una ventaja competitiva en el contexto de la globalización.

La economía circular enfrenta varios desafíos importantes que dificultan su adopción generalizada. Muchas empresas carecen de la información, confianza y capacidades necesarias para implementar los principios de la economía circular, lo que ralentiza el progreso. Además, el sistema financiero sigue enfocado en inversiones lineales, considerando los modelos de gestión innovadores como demasiado riesgosos y complejos, lo que mantiene la economía "encerrada" en un esquema lineal. Los hábitos tradicionales de consumo también obstaculizan el desarrollo de nuevos productos y servicios, especialmente cuando los precios no reflejan los costos reales de producción y consumo. Otra barrera importante es que muchos productos son difíciles de reciclar o desensamblar, ya que los diseñadores actuales a menudo no incorporan consideraciones sobre gestión de residuos y reciclaje en sus diseños. Estos obstáculos, en conjunto, impiden la transición hacia una economía circular más sostenible. Para superar estos desafíos, la economía circular requiere la integración de la gestión del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, reutilización y reciclaje. Esta transición puede lograrse de dos maneras clave. Primero, las empresas individuales pueden asumir la responsabilidad gestionando todo el ciclo de vida del producto, asegurando la sostenibilidad desde la producción hasta la disposición final. Segundo, una colaboración intensa entre empresas puede impulsar prácticas circulares, aunque este enfoque conlleva el riesgo de formar cárteles, lo que podría perjudicar la competencia en el mercado. Ambas estrategias tienen el potencial de avanzar la economía circular, pero requieren una implementación cuidadosa para evitar consecuencias no deseadas (Cárdenas, 2018).

La transición hacia una economía circular requiere un enfoque multifacético que combine políticas, incentivos económicos, participación pública e infraestructura técnica. Los gobiernos y las autoridades regionales juegan un papel fundamental en la creación de un entorno propicio mediante marcos regulatorios, instrumentos económicos, campañas de concienciación e inversiones en sistemas de gestión de residuos. A nivel de políticas, las autoridades pueden implementar estrategias de planificación y establecimiento de metas, integrar los principios de la economía circular

en la contratación pública y adaptar la planificación urbana para apoyar el uso sostenible de los recursos. Los permisos ambientales pueden estructurarse para fomentar prácticas circulares, mientras que la legislación puede establecer objetivos ambiciosos para la prevención de residuos, la reutilización y el reciclaje (Aldana-Rodríguez, Sánchez-Valdés, Vargas-Martínez y Guadarrama-Tavira, 2023).

Al integrar estas medidas políticas, económicas, técnicas e informativas, los responsables de las políticas pueden avanzar de manera sistemática en la economía circular, reduciendo los residuos, optimizando el uso de los recursos y creando un modelo económico más sostenible. La implementación de los principios de la economía circular puede conducir a ahorros de costos, reducción de residuos y a una economía global más sostenible.

Turismo circular y sostenible

El turismo circular es un modelo turístico orientado a proteger el patrimonio cultural y el medio ambiente de los destinos visitados. Su objetivo es ofrecer una experiencia turística más responsable, sostenible y auténtica, que beneficie tanto a los viajeros como a las comunidades anfitrionas. La circularidad del turismo y la economía busca contrarrestar el impacto negativo causado por los modelos lineales (extracción de recursos naturales, fabricación, consumo y desecho). La economía circular puede implementarse en el turismo de diversas maneras. En primer lugar, la reducción de residuos es fundamental. Las empresas turísticas, como hoteles y restaurantes, pueden adoptar programas de reciclaje y reutilización de materiales, por ejemplo, dando una segunda vida a muebles o decoraciones en lugar de desecharlos. Asimismo, es esencial minimizar el uso de plásticos mediante el empleo de empaques y productos biodegradables o reutilizables. Otra estrategia clave es mejorar la eficiencia energética. La incorporación de fuentes de energía renovable, como paneles solares o turbinas eólicas, permite disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Además, el uso de tecnologías eficientes en iluminación, calefacción y refrigeración puede reducir significativamente el consumo de energía en las instalaciones turísticas. En cuanto a la movilidad sostenible, promover el uso del transporte

público o vehículos compartidos entre los turistas ayuda a reducir la huella de carbono. También se pueden incentivar opciones como el ciclismo y el senderismo, que no solo benefician al medio ambiente, sino que también enriquecen la experiencia turística. La conservación de los recursos naturales es otro aspecto esencial. La implementación de sistemas de riego eficientes y técnicas de captación de agua pluvial en hoteles y restaurantes ayuda a optimizar el uso del agua. Asimismo, es crucial desarrollar prácticas que protejan la biodiversidad y los ecosistemas locales mediante programas de conservación en áreas naturales.

El turismo circular también puede potenciarse promoviendo experiencias locales y productos sostenibles. Apoyar a los productores locales mediante la compra de bienes y servicios dentro de la región contribuye a la economía local y reduce el impacto ambiental asociado al transporte de mercancías. De igual manera, el turismo responsable fomenta experiencias que respetan el medio ambiente e involucran a las comunidades locales, como el ecoturismo. La educación y la sensibilización juegan un papel fundamental. Capacitar al personal de la industria turística en prácticas sostenibles y en los principios de la economía circular permite transmitir estos valores a los turistas. Además, informar a los visitantes sobre la importancia de la sostenibilidad y cómo pueden contribuir durante su estancia fomenta un turismo más consciente y responsable. De manera similar, los modelos de negocio innovadores pueden facilitar la transición hacia un turismo más sostenible. El desarrollo de alojamientos circulares que utilicen materiales reciclados o sostenibles en su construcción, así como la implementación de sistemas de gestión de residuos que promuevan la reutilización, son acciones clave. Asimismo, la economía colaborativa puede jugar un papel importante mediante plataformas que permiten a los viajeros intercambiar servicios y recursos, como el alquiler de espacios y actividades. En conjunto, estas estrategias contribuyen a la transformación del turismo en un sector más sostenible y respetuoso con el medio ambiente, alineado con los principios de la economía circular (Ellen MacArthur Foundation, 2025).

La implementación de la economía circular en el sector turístico no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también genera una serie de beneficios económicos importantes para las empresas de la industria. Este modelo permite optimizar el uso de los recursos, reducir costos y

mejorar la competitividad en un mercado cada vez más exigente. Uno de los principales beneficios económicos de la economía circular en el turismo es la reducción de los costos operativos. Al priorizar la eficiencia en el uso de recursos, las empresas pueden disminuir significativamente sus gastos en agua, energía y materias primas. Además, la reutilización y el reciclaje de materiales reducen la necesidad de adquirir constantemente nuevos equipos y mobiliario, lo que resulta en ahorros financieros a largo plazo. Otro aspecto clave es la innovación y la diferenciación en el mercado. En un contexto donde la sostenibilidad cobra cada vez más valor entre los consumidores, las empresas que integran prácticas circulares en sus operaciones pueden posicionarse de manera más competitiva. Este enfoque no solo atrae a una base de clientes más amplia y comprometida, sino que también puede traducirse en un aumento de ingresos y fidelización. Asimismo, la economía circular puede generar nuevas fuentes de ingresos. Estrategias como la reventa de productos usados, la prestación de servicios de reparación o la colaboración con negocios locales para el suministro de alimentos y artesanías representan oportunidades económicas adicionales. Estas iniciativas no solo diversifican los ingresos de las empresas turísticas, sino que también fortalecen la economía local y fomentan la creación de empleo.

El cumplimiento normativo es otra ventaja estratégica de este modelo. En un contexto donde las leyes ambientales son cada vez más estrictas, las empresas que adoptan los principios circulares están mejor preparadas para cumplir con estos requerimientos legales, lo que les permite evitar sanciones financieras y costos asociados al incumplimiento normativo. Finalmente, la adopción de la economía circular en el turismo contribuye a mejorar la imagen de marca. Los consumidores modernos valoran cada vez más la sostenibilidad y buscan experiencias turísticas que reflejen un compromiso genuino con la responsabilidad ambiental. En este sentido, las empresas que implementan prácticas circulares pueden fortalecer su reputación y atraer a un segmento de mercado más consciente del medio ambiente y dispuesto a pagar por opciones sostenibles (Gálvez Rogel, Garaicoa Fuentes y Barros Gavino, 2024).

La participación del consumidor es un elemento clave en la implementación de la economía circular en el turismo, ya que sus decisiones de viaje pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad del sector.

A través de elecciones responsables, los viajeros pueden promover modelos turísticos más sostenibles que estén alineados con los principios de la circularidad. Un aspecto fundamental es la selección de destinos responsables. Elegir lugares que promuevan prácticas sostenibles y cuenten con certificaciones en turismo responsable representa un primer paso crucial. La investigación previa sobre iniciativas de economía circular implementadas en destinos turísticos puede influir positivamente en la demanda de dichas prácticas. De manera similar, la elección de alojamientos sostenibles juega un papel esencial. Optar por hoteles, hostales o establecimientos que implementen estrategias eficientes de gestión de residuos, medidas de conservación del agua y el uso de energías renovables fortalece el compromiso con la circularidad en el turismo. Este tipo de alojamientos no solo minimizan el impacto ambiental, sino que también sirven como modelo para la industria en general. Apoyar los productos y servicios locales es otra acción significativa. Priorizar el consumo de bienes producidos localmente, en lugar de adquirir productos de cadenas internacionales, contribuye al desarrollo económico de las comunidades anfitrionas y reduce la huella de carbono asociada al transporte de mercancías. La reducción de residuos por parte de los turistas también es un factor determinante. Utilizar botellas reutilizables, bolsas de tela y otros artículos sostenibles disminuye la generación de desechos plásticos y fomenta hábitos de consumo más responsables. Además, elegir actividades culturales y ecológicas favorece la conservación ambiental y la valoración del patrimonio local. Participar en experiencias como caminatas guiadas en áreas protegidas o visitas a mercados tradicionales permite a los viajeros contribuir a la preservación tanto del medio ambiente como de la cultura de los destinos que visitan. Finalmente, la comunicación directa con los establecimientos turísticos puede servir como un mecanismo de cambio. Expresar a hoteles y proveedores de servicios la importancia de implementar prácticas sostenibles y circulares puede motivarlos a adaptar sus modelos de negocio hacia una mayor responsabilidad ambiental (Santiago-Cruz, 2020).

Uno de los beneficios principales del turismo circular en este contexto radica en la descentralización de los flujos turísticos. A través del turismo de proximidad, se reduce la presión sobre ciertos destinos altamente demandados, previniendo el deterioro acelerado de su patrimonio cultural.

Este enfoque no solo permite una mejor gestión de los recursos, sino que también mejora la experiencia del viajero, ya que los visitantes pueden disfrutar de entornos menos concurridos y más auténticos. Además, la gestión y el mantenimiento del patrimonio cultural, incluidos museos, monumentos y sitios arqueológicos, se benefician de un modelo turístico que prioriza la calidad sobre la cantidad de visitantes. La afluencia masiva de turistas incrementa el desgaste de la infraestructura y eleva los costos de conservación, haciendo que la sostenibilidad a largo plazo sea más desafiante. En este sentido, el turismo circular ofrece una alternativa que armoniza la actividad turística con la necesidad de preservar estos bienes para las futuras generaciones. Otro factor crucial es la interconexión entre la protección ambiental y la conservación del patrimonio cultural. La contaminación del aire, uno de los efectos negativos del turismo convencional, contribuye significativamente al deterioro de edificios y monumentos históricos, acelerando la erosión y el desgaste estructural. La reducción de la huella ecológica mediante el uso de transporte sostenible, el consumo responsable y la minimización de residuos —promovidos por la economía circular— influye directamente en la prolongación de la vida útil del patrimonio cultural (Ortiz Martínez y Mazó Quevedo, 2024).

En conclusión, la promoción de la economía circular en el turismo requiere tanto la participación activa de los consumidores como una sólida colaboración intersectorial entre gobiernos, empresas y organizaciones de la sociedad civil. A través de la implementación de regulaciones efectivas, incentivos financieros, investigación y el intercambio de conocimientos, es posible avanzar hacia un modelo turístico más sostenible, resiliente y circular que se alinee plenamente con los principios de la circularidad.

Metodología

Escala circular para la evaluación de la sustentabilidad y la circularidad en el turismo

La *escala circular* (una propuesta desarrollada por los autores) es una metodología de evaluación diseñada para medir el nivel de sustentabilidad y

circularidad de las empresas del sector turístico. Proporciona un marco para identificar áreas de mejora y fomentar la adopción de prácticas más responsables, basadas en acciones concretas que contribuyen al impacto ambiental y social, la eficiencia económica y la adopción de prácticas circulares. La metodología integra tres criterios esenciales de ponderación: impacto, inversión e implementación, a los que nos referimos como las 3I, permitiendo calcular una puntuación total para cada acción evaluada.

Criterios de ponderación (las 3I)

1. *Impacto:* Se mide en función de cómo la acción contribuye positivamente al medio ambiente, la economía circular y las comunidades. Las acciones con mayor impacto ecológico y social recibirán una mayor puntuación.
2. *Inversión:* Se evalúa el nivel de recursos necesarios para implementar la acción, tanto económicos como humanos y materiales. Las acciones que requieran mayor inversión serán evaluadas con puntuaciones más altas, reflejando su capacidad para generar cambios a largo plazo.
3. *Implementación:* Se refiere a la facilidad o complejidad con que una acción puede ser ejecutada dentro de la operación de la empresa.

La metodología utiliza la formula:

$$Puntaje\ final = \frac{(Impacto + Inversión + Implementación)}{3}$$

Cada uno de estos criterios es puntuado en una escala del 1 al 10, y el puntaje total de la acción se obtiene sumando los puntajes de los tres criterios y dividiéndolos entre tres, para obtener el puntaje ponderado final.

Proceso

1. *Evaluación de acciones:* Las empresas deben identificar y listar las acciones implementadas en sus operaciones. Luego, se evalúa cada acción según los tres criterios de ponderación (Impacto, Inversión, Implementación) en una escala del 1 al 10.
2. *Cálculo de puntuación:* Una vez evaluada cada acción, se suman los puntajes de los tres criterios y se dividen entre tres para obtener el puntaje ponderado final de cada acción.
3. *Clasificación por niveles:* El puntaje total de todas las acciones se clasifica en un nivel que va del 1 al 10, según el rango de puntos alcanzados.

Escala de niveles de acción

La metodología utiliza una escala de puntuación para clasificar las acciones concretas en cinco niveles de complejidad e impacto:

Tabla 11.1. *Acciones básicas (nivel 1-2): Acciones simples, de bajo costo, fáciles de implementar y con impacto mínimo*

Acción	*Impacto*	*Inversión*	*Implementación*	*Puntos*
Acceso a agua filtrada para reducir consumo de botellas de plástico.	2	1	2	2
Eliminación de empaques innecesarios en productos vendidos.	2	1	2	2
Implementación de digitalización para reducir papel.	2	1	2	2
Preferencia por proveedores locales.	2	1	2	2
Promoción activa del turismo responsable a clientes (folletos, información en habitaciones).	2	1	2	2
Reducción de plásticos de un solo uso.	2	1	2	2
Separación básica de residuos (colocación de contenedores).	2	1	2	2
Uso de mobiliario y decoración de segunda mano o reciclado.	2	1	2	2
Uso de productos biodegradables (bolsas, empaques, cubiertos).	2	1	2	2
Uso eficiente de agua y energía (carteles de concienciación).	2	1	2	2
Total			**20**	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11.2. *Acciones intermedias (nivel 3-4): Acciones que requieren mayor planificación, inversión o compromiso*

Acción	*Impacto*	*Inversión*	*Implementación*	*Puntos*
Certificaciones de buenas prácticas ambientales, impacto social y gestión de residuos (Distintivo S (SECTUR México & EarthCheck) MX, Travelife, Green Key, Blue Flag)	4	3	4	4
Creación de un programa de voluntariado ambiental para turistas.	3	4	4	4
Fomentar transporte compartido para empleados o turistas.	3	3	4	3
Implementación de materiales reciclados en mobiliario o construcción.	4	4	3	4
Implementación de menús con opciones de alimentos locales y orgánicos.	4	4	4	4
Instalación de sistemas de reducción de agua (regaderas, grifos ahorradores).	3	4	3	3
Programa de capacitación en sustentabilidad para empleados.	4	3	3	3
Sistema de compostaje básico para residuos orgánicos.	3	4	4	4
Turismo responsable (prohibir actividades que dañen ecosistemas o comunidades).	4	3	3	3
Uso de productos de limpieza ecológicos.	3	4	4	4
Total			**36**	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11.3. *Acciones avanzadas (nivel 5-6): Acciones con inversión moderada y cambios operativos significativos*

Acción	*Impacto*	*Inversión*	*Implementación*	*Puntos*
Certificación de eficiencia de recursos, impacto social y buenas prácticas ambientales. (ISO 14001, Rainforest Alliance, ISO 50001, LEED, Biosphere, EarthCheck)	6	5	5	5
Implementación de sistema de reciclaje avanzado con separación detallada.	6	5	6	6
Implementación de Sistemas de Iluminación LED y Sensores de Movimiento	5	5	6	5
Instalación de paneles solares o energía renovable parcial.	6	7	6	6
Medición de huella de carbono.	4	5	5	5
Reducción significativa de desperdicio de alimentos (donación, control de compras).	5	4	5	5
Transporte sustentable para clientes y empleados.	6	7	6	6
Uso de agua reciclada o captación de agua de lluvia.	5	6	6	6
Total			**44**	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11.4. *Acciones de alto impacto (nivel 7-8): Cambios estructurales con impacto directo en la circularidad*

Acción	*Impacto*	*Inversión*	*Implementación*	*Puntos*
Certificaciones ambientales de sustentabilidad y de economía circular (Carbon Neutral, Smart Voyager, B Corp).	6	8	7	7
Construcción bajo principios de arquitectura sustentable (bioclimática, reciclaje de materiales).	8	8	8	8
Instalación de planta de tratamiento de aguas residuales.	7	8	7	7
Optimización de la Logística para Reducir la Huella de Carbono.	6	7	7	7
Política de cero residuos (90-100% de los desechos desviados de vertederos, Zero Waste Certification).	8	8	8	8
Producción de energía renovable para autoabastecer operación.	8	8	8	8
Reutilización de Materiales en la Construcción de Infraestructura.	7	7	8	7
Total		**52**		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11.5. *Acciones de liderazgo (nivel 9-10): Empresas líderes en sostenibilidad y circularidad, con prácticas disruptivas e impacto global*

Acción	*Impacto*	*Inversión*	*Implementación*	*Puntos*
Creación de fondos de inversión en iniciativas sustentables.	9	10	9	9
Desarrollo de materiales innovadores circulares para el turismo (textiles reciclados, ecotecnologías, Cradle to Cradle).	9	10	10	10
Exigencia de criterios de sustentabilidad en toda la cadena de valor (proveedores).	10	9	9	9
Modelo de negocio 100% sustentable y circular (hotel autosuficiente, cero residuos, huella de carbono neutral).	10	10	10	10
Regeneración ambiental (reforestación, restauración de ecosistemas, conservación de biodiversidad).	10	10	10	10
Total		**48**		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11.6. *Puntuación y clasificación de los niveles de sostenibilidad y circularidad*

Nivel	*Rango de puntos*	*Descripción*
1	1-20	Acciones básicas implementadas, impacto mínimo
2	21-40	Buenas prácticas iniciales, pero falta mayor integración
3	41-60	Buenas prácticas, falta integración total
4	61-80	Implementación avanzada con impacto medible
5	81-100	Implementación avanzada con impacto significativo
6	101-120	Compromiso alto con la sustentabilidad y economía circular
7	121-140	Compromiso alto con acciones de mayor impacto
8	141-160	Empresa comprometida con la transición circular
9	161-180	Empresa modelo, totalmente sustentable y circular
10	181-200	Empresa líder en sustentabilidad y circularidad, con impacto global

Fuente: elaboración propia.

Si una empresa posee una certificación específica, dependiendo de la certificación, automáticamente avanza a un cierto nivel dentro de la escala, ya que la certificación valida que la empresa ya cumple con las acciones de niveles inferiores.

Criterios para la escala de certificación

Criterio 1. No se duplican puntos si dos certificaciones validan lo mismo

Si una empresa tiene, por ejemplo, Biosphere y Travelife, ambas incluyen:

- Gestión eficiente de agua y energía.
- Uso de productos *ecofriendly*.
- Apoyo a comunidades locales.

En este caso, no se suman puntos extra por ambas certificaciones, ya que validan lo mismo, se otorgan los puntos una sola vez por cumplir esos criterios.

Criterio 2. Se suman puntos solo si la segunda certificación agrega nuevos criterios

Si una empresa tiene Biosphere y luego obtiene LEED, esta última certificación incluirá:

- Diseño arquitectónico sustentable.
- Uso de materiales reciclados en construcción.
- Medición de eficiencia energética del edificio.

En este caso, sí se otorgan puntos extra, porque LEED introduce criterios nuevos.

Criterio 3. Se reconoce la certificación más avanzada en caso de solapamiento

Ejemplo con Distintivo S (México) y EarthCheck:

- EarthCheck ya evalúa la mayoría de los requisitos del Distintivo S, pero con estándares más rigurosos.
- Si una empresa tiene ambas, se toma solo EarthCheck como referencia para evitar puntuación inflada.

Se otorgan puntos según la certificación con el mayor impacto en la Escala Circular.

Aplicación práctica y recomendaciones de la escala circular

La Escala Circular es una herramienta versátil diseñada para aplicarse en empresas turísticas de cualquier tamaño, desde pequeños alojamientos hasta grandes cadenas hoteleras, operadores turísticos y agencias de viajes. Su enfoque estructurado permite que cualquier negocio del sector evalúe su nivel de sostenibilidad y circularidad, identifique áreas de mejora y avance gradualmente hacia un modelo más sostenible.

Pequeñas empresas y negocios locales

Las micro y pequeñas empresas turísticas, como hostales, *eco-lodges* o tour operadores locales, pueden usar la escala circular para implementar acciones de bajo costo y alto impacto que las ayuden a mejorar su competitividad. Algunas estrategias clave incluyen:

- Eliminación de plásticos de un solo uso en hospedaje y actividades.
- Promoción del turismo responsable mediante información clara a los clientes.
- Preferencia por proveedores locales para fortalecer la economía circular.
- Uso eficiente de recursos como agua y energía mediante medidas básicas.

Beneficio

- Mejora su atractivo para turistas que buscan experiencias sostenibles sin requerir grandes inversiones.

Hoteles y cadenas de hospedaje

Para los hoteles medianos y grandes, la escala circular ayuda a estructurar una estrategia integral de sostenibilidad, permitiendo que cada departamento contribuya a la reducción del impacto ambiental. Algunas acciones incluyen:

- Instalación de paneles solares o fuentes de energía renovable.
- Optimización en la gestión de residuos mediante separación avanzada y compostaje.
- Capacitación en sustentabilidad para empleados e integración de prácticas ecológicas en el servicio.
- Medición de la huella de carbono y establecimiento de metas de reducción.

Beneficio

- Diferenciación en el mercado, cumplimiento de normativas ambientales y acceso a certificaciones internacionales.

Grandes Empresas y Cadenas Globales

Las empresas líderes en el sector turístico pueden aprovechar la Escala Circular para consolidar su transformación hacia un modelo de negocio 100% sustentable y circular, aplicando estrategias como:

- Certificaciones ambientales (LEED, Carbon Neutral, Biosphere) para garantizar estándares globales.
- Producción de energía renovable para el autoabastecimiento de operaciones.
- Implementación de políticas de "cero residuos" desviando el 90-100% de desechos de vertederos.
- Desarrollo de materiales innovadores circulares, como textiles reciclados y ecotecnologías.

Beneficio

- Posicionamiento como referente global en sustentabilidad, reducción de costos operativos a largo plazo y liderazgo en la transición hacia una economía circular.

Cada empresa puede utilizar la Escala Circular de acuerdo con sus necesidades y capacidades, iniciando con acciones básicas y avanzando de nivel conforme adopta mejores prácticas. Además, la metodología permite:

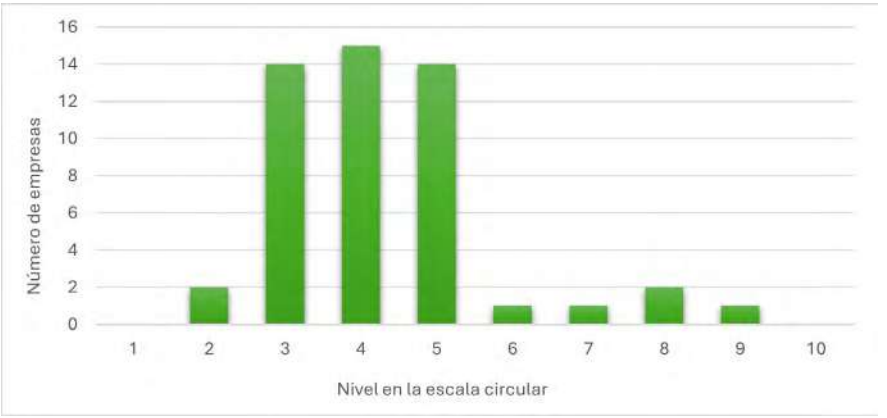
- Monitorear avances y medir impacto a lo largo del tiempo.
- Obtener un diagnóstico claro del estado actual de sustentabilidad.
- Recibir recomendaciones específicas para mejorar según su nivel.

Resultados y discusión

El turismo sostenible en México ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años, consolidándose como una estrategia clave para reducir el impacto ambiental y promover un desarrollo responsable del sector. México, reconocido por su biodiversidad, cultura vibrante y destinos turísticos únicos, ha implementado diversas iniciativas orientadas a la sostenibilidad, impulsadas por una creciente conciencia sobre los efectos ambientales y sociales del turismo. Entre estos esfuerzos destacan las certificaciones de turismo sostenible, como el Certificado de Turismo Sustentable (CTS), otorgado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Estas certificaciones no solo fomentan prácticas responsables, sino que también posicionan al país como un referente regional. Se estima que, para 2026, México contará con 78 playas, dos marinas y 40 embarcaciones certificadas con el distintivo Blue Flag, reflejando avances en la adopción de estándares internacionales de sostenibilidad.

La conservación de la biodiversidad es otro pilar fundamental del turismo sostenible en México. Albergando aproximadamente el 12% de la biodiversidad mundial, el país cuenta con numerosas áreas protegidas que implementan estrategias de turismo sostenible, como la Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an y la Mariposa Monarca. Estas iniciativas tienen como objetivo preservar los ecosistemas mientras promueven un turismo responsable que genere beneficios económicos y sociales para las comunidades locales. En este contexto, la participación comunitaria es crucial, ya que el 30% de los destinos de turismo sostenible en México involucran a las poblaciones locales en la gestión de sus recursos naturales y culturales. Ejemplos se encuentran en estados como Chiapas y Oaxaca, donde el turismo comunitario ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la calidad de vida de los residentes, preservar la identidad cultural y fomentar el desarrollo económico en zonas rurales. El impacto de las certificaciones en el turismo rural es especialmente notable, ya que más de 100 establecimientos del sector han obtenido distintivos de sostenibilidad.

Figura 11.1. *Distribución de las empresas turísticas en México según el nivel de la escala circular*



Fuente: elaboración propia.

El gráfico muestra la distribución de las empresas turísticas en México según su nivel de sostenibilidad, evaluado a través de la escala circular. Esta escala clasifica las prácticas sostenibles y circulares implementadas por las empresas, organizándolas en niveles que van desde acciones básicas con impacto limitado hasta estrategias avanzadas y de liderazgo en sostenibilidad.

El análisis revela que, aunque la mayoría de las empresas se encuentran en niveles intermedios, existe un potencial significativo de mejora en el sector turístico mexicano. Las principales oportunidades incluyen la adopción de prácticas más avanzadas en la gestión de recursos, la implementación de tecnologías sostenibles y la integración de sistemas circulares, como el reciclaje y la eficiencia energética. Este enfoque representa una oportunidad para que las empresas fortalezcan su compromiso con la sostenibilidad, impulsando su transición hacia modelos de negocio más circulares y resilientes, lo cual no solo beneficia al medio ambiente, sino que también mejora la competitividad y la reputación del sector en un mercado global cada vez más exigente en términos de responsabilidad social y ambiental.

Aplicación de la escala circular en las empresas

Hotel El Ganzo (San José del Cabo, B.C.S.):

- **Nivel 2** (Buenas prácticas iniciales, pero falta mayor integración)

Tabla 11.7. *Análisis 1 con la escala circular*

Acciones	*Puntos*
Uso de energía renovable parcial	6
Preferencia por productos locales	2
Uso de productos biodegradables	2
Reducción de plásticos de un solo uso	2
Programa de capacitación en sustentabilidad para empleados	3
Uso de productos de limpieza ecológicos	4
Separación básica de residuos	2
Uso eficiente de agua y energía	2
Turismo responsable (prohíben actividades dañinas)	3
Certificación de eficiencia de recursos (EarthCheck)	5
Total	**31**

Fuente: elaboración propia.

Xcaret (Riviera Maya, Q.R.)

- **Nivel 4** (Implementación avanzada con impacto medible)

Tabla 11.8. *Análisis 2 con la escala circular*

Acciones	*Puntos*
Certificación EarthCheck	5
Uso de energía renovable parcial	6
Política de cero residuos	8
Uso de agua reciclada o captación de lluvia	6
Programa de conservación de flora y fauna	7
Regeneración ambiental (reforestación, conservación)	10
Transporte sustentable para empleados	6
Reducción significativa de desperdicio de alimentos	5
Separación avanzada de residuos	6
Turismo responsable (prohibición de actividades dañinas	3
Preferencia por productos locales	2
Uso de productos biodegradables	2
Promoción del turismo responsable a clientes	2
Total	**68**

Fuente: elaboración propia.

Hotel Azulik (Tulum, Q.R.)

- **Nivel 2** (Buenas prácticas, falta integración total)

Tabla 11.*9. Análisis 3 con la escala circular*

Acciones	*Puntos*
Uso de energía renovable parcial	6
Captación de agua de lluvia	6
Uso de productos biodegradables	2
Reducción de plásticos de un solo uso	2
Uso de materiales reciclados en construcción	4
Separación avanzada de residuos	6
Uso eficiente de agua y energía	2
Preferencia por proveedores locales	2
Promoción del turismo responsable	2
Certificación Biosphere	5
Total	37

Fuente: elaboración propia.

Los ecoalbergues y hostales en zonas rurales ofrecen experiencias auténticas que promueven la conservación del medio ambiente y fortalecen las economías locales. Como una alternativa al turismo masivo, este enfoque permite a los visitantes disfrutar de la naturaleza mientras contribuyen al bienestar de las comunidades anfitrionas. Mientras tanto, las principales ciudades mexicanas también han comenzado a adoptar medidas de turismo sostenible. Ciudades como Ciudad de México y Guadalajara han implementado políticas verdes y proyectos urbanos sostenibles, incluyendo rutas de ecoturismo y transporte público ecológico, con el objetivo de reducir la huella de carbono del turismo urbano y fomentar prácticas responsables en las zonas metropolitanas.

No obstante, a pesar de estos avances, el turismo masivo continúa representando un desafío en México. Destinos como la Riviera Maya han sufrido una degradación ambiental significativa debido al crecimiento descontrolado del turismo. La UNESCO ha advertido sobre los riesgos para los ecosistemas marinos de la región, incluyendo la pérdida de corales y la disminución de la biodiversidad. Además, estudios del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) han indicado que la sobreexplotación turística puede ejercer una presión excesiva sobre los recursos locales,

afectando la disponibilidad de agua y energía y reduciendo la calidad de vida de las comunidades residentes. En este sentido, la educación sobre turismo sostenible se presenta como una herramienta fundamental para mitigar estos impactos. Los programas educativos dirigidos a turistas y operadores turísticos pueden ayudar a generar conciencia sobre prácticas responsables, como la reducción de residuos y el cumplimiento de normativas de conservación. La formación académica también desempeña un papel clave en el fortalecimiento del turismo sostenible en México. Además, es destacable el uso creciente de energías renovables en la industria hotelera, con un 20% de los hoteles sostenibles del país, utilizando fuentes de energía solar y eólica para reducir su impacto ambiental. Ejemplos como el hotel El Dorado Royale, en Quintana Roo, sobresalen por sus prácticas ecológicas innovadoras y sistemas de energía limpia.

La conservación oceánica es otra área en la que México ha demostrado un compromiso significativo. Iniciativas como el Programa de Conservación de la Tortuga Marina en la Riviera Maya y el Protocolo de Buceo Responsable buscan proteger las especies marinas y promover prácticas turísticas que respeten los ecosistemas oceánicos. Además, el país alberga eventos y festivales ecológicos que fomentan la conciencia ambiental y el turismo sostenible, como el Festival Internacional de la Biodiversidad y el Eco-Festival en Playa del Carmen. Estas actividades no solo educan a los visitantes sobre la importancia de la sostenibilidad, sino que también refuerzan el compromiso de los turistas con prácticas responsables. En conjunto, estas estrategias y esfuerzos destacan el potencial de México para consolidarse como un líder en turismo sostenible. Si bien aún existen desafíos, la implementación de políticas adecuadas, el fortalecimiento de la educación ambiental y la integración de energías renovables pueden contribuir a un modelo turístico más equilibrado. El desarrollo del turismo sostenible es esencial para garantizar que las futuras generaciones puedan disfrutar de los destinos turísticos del país sin comprometer sus recursos naturales y culturales.

Dentro del Programa Sectorial de Turismo 2020-2024, la Secretaría de Turismo (Sectur) estableció como uno de sus objetivos prioritarios la promoción del turismo sostenible a nivel nacional. En este contexto, se implementó la estrategia conocida como *México Renace Sostenible*, cuyo objetivo

es crear circuitos turísticos que fomenten el bienestar social y la armonía con la naturaleza. Esta iniciativa busca integrar a pueblos y comunidades involucradas en actividades turísticas sin comprometer sus procesos bioculturales. Uno de los proyectos clave dentro de esta estrategia es *Kuxatur*, que significa "turismo vivo". Su propósito es conservar la biodiversidad en ecosistemas costeros mediante el diseño e implementación de políticas innovadoras y modelos turísticos sostenibles. Este proyecto se desarrolla en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), y abarca el corredor La Paz–Sierra La Laguna y Los Cabos en Baja California Sur, el corredor Huatulco–Chacahua en Oaxaca, y la región Maya Ka'an en Quintana Roo. Adicionalmente, el proyecto *Adaptur*, financiado con recursos de la cooperación alemana (GIZ), tiene como finalidad implementar medidas de adaptación al cambio climático con la participación del sector privado. Este proyecto ha beneficiado a seis destinos turísticos clave: Riviera Nayarit-Jalisco, Riviera Maya en Quintana Roo, San Miguel de Allende en Guanajuato, Valle de Bravo en el Estado de México, Los Cabos en Baja California Sur y la Ciudad de México. La selección de destinos costeros para estos proyectos se basa en el papel crucial que desempeñan los ecosistemas costeros en la biodiversidad global y su función como barreras naturales ante fenómenos meteorológicos extremos. La conservación de estos ecosistemas no solo beneficia a la flora y fauna locales, sino que también protege a las comunidades humanas que dependen de ellos.

Desde una perspectiva científica y económica, la inversión en proyectos sostenibles dentro del sector turístico representa una respuesta estratégica ante la creciente demanda de un turismo responsable y respetuoso con el medio ambiente. Los viajeros modernos buscan experiencias auténticas y valoran cada vez más aquellos destinos que garantizan la preservación de su patrimonio natural y cultural. México, con su vasta diversidad biológica y riqueza cultural, posee el potencial necesario para posicionarse como un líder global en turismo sostenible. La implementación de medidas de conservación y adaptación resulta esencial para salvaguardar esta riqueza natural y cultural para las futuras generaciones. Asimismo, el papel del sector privado es fundamental en la promoción de la sostenibilidad en el país. Diversas empresas y corporaciones han adoptado prácticas sos-

tenibles, reconociendo que la sostenibilidad no solo mejora su competitividad, sino que también constituye un pilar clave para el desarrollo económico y social de México. La colaboración entre gobierno, iniciativa privada y sociedad civil es, por tanto, indispensable para consolidar un modelo turístico equilibrado, resiliente y circular.

En este sentido, numerosas empresas han implementado políticas ambientales, fomentado la eficiencia energética y adoptado tecnologías limpias. La inversión en energías renovables, la reducción de emisiones y la gestión sostenible de los recursos forman parte de estrategias corporativas orientadas a minimizar el impacto ambiental y preservar la biodiversidad. La economía circular también ha cobrado relevancia en el sector privado, promoviendo la reducción, reutilización y reciclaje de materiales con el fin de minimizar la generación de residuos y optimizar el uso de recursos. A su vez, los programas de responsabilidad social empresarial han emergido como herramientas clave, al involucrar a las comunidades locales en proyectos de conservación y educación ambiental. La colaboración entre el sector privado y las comunidades resulta esencial para desarrollar proyectos sostenibles que beneficien tanto al entorno natural como a la sociedad. No obstante, la sostenibilidad no es responsabilidad exclusiva del gobierno ni de las grandes corporaciones; requiere también de la participación activa de la sociedad. Los consumidores informados y comprometidos pueden impulsar cambios significativos a través de sus decisiones de consumo y estilo de vida, contribuyendo así al establecimiento de un modelo turístico más equilibrado y respetuoso, que preserve el patrimonio natural y cultural de México para las generaciones futuras.

El turismo sostenible en México está en constante crecimiento y evolución, con numerosas iniciativas destinadas a equilibrar el disfrute del turismo con la protección ambiental y el desarrollo de las comunidades locales. Con estos notables esfuerzos, es evidente que México está dando pasos significativos hacia un futuro más responsable y sostenible en el turismo. Sin embargo, aún existen amplias áreas de oportunidad que deben abordarse. Parte de esto implica la educación y la promoción de diversas estrategias para mejorar el desarrollo del turismo sostenible.

Conclusiones

La implementación de los principios de economía circular en el turismo no solo beneficia al medio ambiente, sino que también puede generar ahorros en costos y una mejor experiencia para el cliente. A medida que los turistas se vuelven más conscientes de su impacto ambiental, los destinos y negocios que adopten prácticas de economía circular estarán mejor posicionados para atraer a un público comprometido con la sostenibilidad. Esto representa una oportunidad significativa para que el sector turístico innove y crezca de manera responsable. En México, el turismo circular es una estrategia clave para reducir el impacto ambiental y promover la sostenibilidad en el sector. A través de la optimización de recursos y la reducción de residuos, se beneficia tanto al medio ambiente como a las comunidades locales. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos como la falta de regulaciones y la necesidad de una mayor concientización. Con políticas adecuadas y educación ambiental, México puede fortalecer este modelo y posicionarse como un líder en turismo sostenible. Además, la colaboración entre gobiernos, empresas y sociedad civil es esencial para su éxito. El turismo circular y sostenible no solo protege los ecosistemas, sino que también impulsa las economías locales y mejora la calidad de vida de las comunidades. Su desarrollo es crucial para garantizar que las futuras generaciones puedan disfrutar y beneficiarse de los destinos turísticos de manera responsable.

Referencias

Aldana-Rodríguez, E., Sánchez-Valdés, A., Vargas-Martínez, E. E. y Guadarrama-Tavira, E. (2023). Incorporación de la economía circular al concepto de sustentabilidad y sus implicaciones en la industria turística en México. *Rosa dos Ventos: Turismo e Hospitalidade, 15*(2), 376-390. https://doi.org/10.18226/21789061.v15i2p376

Azulik. (n.d.). *Art, nature, and ritual.* https://www.azulik.com

Buckley, R. (2012). Sustainable tourism: Research and reality. *Annals of Tourism Research, 39*(2), 528-546. https://doi.org/10.1016/j.annals.2012.02.003

Cárdenas, M. (2018). *La economía circular, un nuevo modelo de producción y consumo sostenible.*

Circular Europe Network. (2025). *Circular Europe Network.* https://www.circular-europe-network.eu/

Cook, F. (2006). *Key world energy statistics.* International Energy Agency, European Commission, 90-99.

El Ganzo Hotel. (n.d.). *A creative hub in Los Cabos.* https://www.elganzo.com

Ellen MacArthur Foundation. (2025). Ellen MacArthur Foundation. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/

Fernández, A. (2015). Economía circular: Repensando el modelo de empresa. *Forbes México,* 78-97.

Few, S. (2009). *Now you see it: Simple visualization techniques for quantitative analysis.* Analytics.

Fuentes, C. (2017). ¿En qué consiste la economía circular? *Sostenibilidad para Todos, 32,* 11-21.

Gálvez Rogel, E. M., Garaicoa Fuentes, F. L. y Barros Gavino, C. D. (2024). Economía circular en cadenas turísticas: Un enfoque hacia la sostenibilidad del sector. *LATAM: Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, 5*(6), 1513-1522. https://doi.org/10.56712/latam.v5i6.3101

GRI Standards. (2020). *Global Reporting Initiative – GRI Standards.* https://www.globalreporting.org/

Guzmán, G. C. (2017). Economía circular, Eco inteligencia, ¿Dónde puede crear valor la economía circular*? University Journal UNAM, 456,* 56-76.

Herrera, G. (2016). *¿Qué es la economía circular?* La Planeta Recicla.

Hotel Xcaret México. (n.d.). *About us.* https://www.hotelxcaret.com

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). *Indicadores de la actividad turística en México.* https://www.inegi.org.mx

Martín, A. (2016). Economía circular; qué es y cómo funciona. *Ovacen, Blog de Sostenibilidad,* 203-209.

Medina, E. (2016). Qué es la economía circular. *Economía circular verde* (pp. 57-68).

México consolida su liderazgo internacional con 120 Distintivos Blue Flag para la temporada 2024-2025. (2024, 3 de junio). Gobierno de México. https://www.gob.mx/sectur/prensa/mexico-consolida-su-liderazgo-internacional-con-120-distintivos-blue-flag-para-la-temporada-2024-2025?idiom=es

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2025). https://www.oecd.org/

Ortiz Martínez, F. I. y Mazó Quevedo, M. L. (2024). *Turismo circular y sustentable en destinos rurales.* Comunicación Científica. https://doi.org/10.52501/cc.213

Reserva de la Biósfera de Sian Ka'an. (2023). *Conservación y turismo.* Sian Ka'an.

Santiago-Cruz, M. J. (2020). Turismo rural, economía circular y desarrollo local: Reflexiones con base en experiencias en el sureste mexicano. En G. X. Pons, A. Blanco-Romero, R. Navalón-García, L. Troitiño-Torralba y M. Blázquez-Salom (Eds.), *Sostenibilidad turística: Overtourism vs. undertourism* (pp. 233-247). Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears.

Secretaría de Turismo de México. (2023). *Estrategia de actividades turísticas sostenibles basadas en el océano en México 2023-2030*.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *Tourism and the SDG's: Sustainable tourism for development*. https://www.unep.org/

World Economic Forum. (2020). *The travel & tourism competitiveness report 2020: Rebuilding for a sustainable and resilient future*. https://www.weforum.org/

World Resources Institute. (2023). *Desarrollo sostenible y equidad social*. WRI.

12. Impulso de un turismo circular en las comunidades con recursos turísticos del municipio de Balancán, Tabasco

Kenia Landero Valenzuela[1]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.12

Resumen

El desarrollo local es visto como un proceso de crecimiento y cambio estructural de la economía de una comunidad, dentro del cual se pueden identificar, las dimensiones: económica, que es caracterizada por un sistema de producción que permite a las empresas locales usar eficientemente los factores productivos, generar economías de escalas y aumentar la productividad a niveles que permitan mejorar la competitividad; dimensión sociocultural, en la cual el sistema de relaciones económicas y sociales, las instituciones locales y los valores, sirven de base al proceso de desarrollo, y la político-administrativa en la cual las iniciativas locales hacen un entorno favorable a la producción e impulsan el desarrollo sustentable y sostenible; por ello esta disertación tiene como objetivo desarrollar estrategias para impulsar un turismo circular en las comunidades rurales del municipio de Balancán, que cuentan con atractivos turísticos a través de prácticas enfocadas a la sustentabilidad y sostenibilidad; por lo anterior se analizan las dimensiones anteriormente citadas, así como la dimensión medioambiental, analizando las actividades que desarrollan en pro de la conservación y preservación de los recursos naturales y culturales; la metodología empleada fue mixta, incluyendo el método cuantitativo y cualitativo, el alcance es descriptivo de tipo no experimental, transversal; las unidades de estudio fueron: visitantes, habitantes y autoridades municipales; siendo las técnicas

[1] Doctora en Administración. Profesora en el Tecnológico Nacional de México, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4561-0155

de recolección de datos el cuestionario y la entrevista. Como principales hallazgos se tiene que las comunidades se encuentran en una etapa inicial del desarrollo de la actividad turística, requiriendo infraestructura, mayor organización en la comunidad.

Palabras clave: *turismo circular, sustentabilidad, sostenibilidad, comunidades.*

Introducción

Actualmente el turismo es una de las actividades económicas más importantes mundialmente; el acceso a internet y las redes sociales, han creado y fortalecido el interés de las personas en conocer distintos lugares del mundo. La actividad turística genera importantes beneficios en los aspectos no sólo económico, sino social y cultural, dentro de los cuales se pueden visualizar el aumento de la inversión en infraestructura, la generación de empleos y la derrama económica que traen consigo los turistas; desde la perspectiva cultural el beneficio es la apreciación de la cultura, tradiciones, gastronomía, artesanías por parte de visitantes; así como el generar valor y conciencia por la misma dentro de comunidad. Dado lo anterior, se puede percibir los grandes beneficios que brinda la actividad turística; México no es la excepción de recibir estos beneficios por dicha actividad, tan solo en el año 2024, el ingreso de divisas por los visitantes internacionales fue de 32, 956.3 millones de dólares, 7.4% más, comparado con los años 2023 y 34.1% más que en el año 2019 (Sectur, 2024). De igual manera, de acuerdo con los resultados de las encuestas de viajeros internacionales, durante el año 2024 ingresaron al país 45 millones de turistas internacionales (INEGI, 2024), lo que representa el 7.4% más respecto a lo captado en el año 2023. El año 2025 para México ha sido favorable en materia turística ya que, de igual forma, se muestra un crecimiento notable, tanto en número de visitantes como en ingresos. En los primeros meses que va del año se han registrado más de 3.8 millones de turistas extranjeros vía aérea, lo que representa un aumento del 2.7% respecto al mismo período del año 2024; de igual manera el ingreso de divisas por turismo internacional también ha aumentado, alcan-

zando los 6 600 millones de dólares en los primeros meses, con un crecimiento del 4.5%, comparándolo respecto al año anterior.

El turismo en Tabasco en los últimos años, de igual forma, ha ido creciendo y recuperándose, promoviendo nuevas rutas turísticas, mejorando la infraestructura, la promoción de rutas como la del cacao, que explora las plantaciones y la historia del chocolate en la región, en la región ríos la ruta ríos maya; así como rutas del queso en los municipios que los producen; esto con la finalidad de ir posicionando al estado como uno de los destinos turísticos importantes del país; de acuerdo a la Secretaría de Turismo (Sectur, 2024) el turismo en Tabasco genera el 4.8% del PIB estatal con una infraestructura de 548 hoteles; Villahermosa que es la capital concentra el 66.8% del PIB turístico de la entidad, ya que es es el principal centro de llegada de turistas, con 1 millón de visitantes en 2024, lo que representa el 5.4% más respecto al año 2023.

El turismo sin duda, trae consigo grandes ventajas y beneficios pero de igual forma al sobreexplotarlo trae impactos o consecuencias negativas para el medio ambiente, como el deterioro de la fauna y flora, la contaminación y destrucción de ecosistemas o el agotamiento de los recursos naturales, entre otros por ello es necesario diseñar estrategias que permitan contrarrestar estos daños a lo cual el gobierno, diversas asociaciones u organizaciones han tomado medidas creando políticas en pro de desarrollar la actividad turística de manera consciente y responsable; H. Goodwin sostiene que el turismo responsable minimiza los impactos negativos sobre el medio ambiente, la cultura y la sociedad, al tiempo maximiza los beneficios económicos y socioculturales para las comunidades locales (2011); asimismo la OMT menciona el turismo consciente busca minimizar el impacto negativo del turismo en el medio ambiente, la cultura y la economía local, mientras maximiza los beneficios para las comunidades y los ecosistemas involucrados (2019).

Existen alternativas del turismo que contribuyen a minimizar los efectos negativos causados por esta actividad sin perder de vista los beneficios; a través del mejoramiento de las comunidades y su relación con el medio ambiente, de una manera sustentable, sostenible y solidaria, fomentando el intercambio cultural; lo que contribuye a directamente a la preservación del medio ambiente y las culturas locales; es cuando hablamos de tipos de

turismo como el sustentable, sostenible, turismo alternativo, de aventura, rural, comunitario, entre otros; los cuales toman en cuenta las repercusiones actuales y futuras que puedan traer consigo en los ámbitos económico, social y medioambiental para satisfacer las necesidades de los visitantes, la industria, el entorno y de las comunidades anfitrionas, es decir dar el uso óptimo a los recursos, respetar la autenticidad sociocultural, gastronómica y de identidad de la comunidad anfitriona, asegurando actividades económicas viables a largo plazo; aunado a esto, como menciona Ruiz, no puede pasar desapercibido la participación de la comunidad en la gestión de la actividad turística y desde luego en su desarrollo (2017) generando un desarrollo local.

El turismo circular es una alternativa que coadyuva al desarrollo de la actividad turística responsable y consciente ya que aplica los principios de la economía circular; al realizar la actividad, pero reduciendo el impacto ambiental y social, al promover prácticas sostenibles, sustentables y regenerativas; haciendo énfasis en la reutilización, reciclaje, es decir uso eficiente de los recursos, beneficiando a las comunidades y concientizando a los viajeros. Este modelo circular que sugiere dicho turismo pretende mejorar la calidad ambiental, la circulación de los recursos, el desarrollo sostenible y sustentable del sector turístico, contribuyendo a la lucha contra el cambio climático; lo que lleva la adopción de medidas que muevan al sector desde un sistema lineal a uno circular lo que implica la optimización de la eficiencia de los recursos (agua, energía), buscando que sean autosuficientes; así como la gestión de residuos y en general prácticas de gestión más eficientes; en este modelo tanto la sociedad como la naturaleza se ven como un sistema interconectado difícil de distinguirse uno de otro; en el cual la finalidad no es alcanzar un impacto cero sino más bien buscar soluciones con impactos positivos en el sistema.

De acuerdo Scheel y Aguiñaga (2016) la aplicación de los principios de la economía circular en el turismo bajo el enfoque circular aporta importantes beneficios como:

- Aumento en las tasas de recuperación y reciclaje de recursos no renovables.
- Reducción en la extracción de recursos naturales.

- Restauración y recuperación del medio ambiente.
- Disminución de emisiones, materias primas y desperdicios
- Responsabilidad social de la empresa; mejorando la interacción con el cliente.
- Reinserción de materiales y recursos valiosos a la cadena productiva.
- Reducción de costos
- Mayor productividad y mejor reputación

Por lo anterior esta disertación tiene como objetivo analizar las dimensiones económica, sociocultural y medioambiental a fin de diseñar estrategias para impulsar un turismo circular que permita el desarrollo local del municipio de Balancán, Tabasco e impulsar un turismo consciente y responsable.

El municipio de Balancán es uno de los municipios del estado de Tabasco que se encuentra en la región ríos del mismo; puesto que en esa zona atraviesa uno de los ríos principales del estado denominado río Usumacinta; el cual pasa por los municipios de Tenosique y Emiliano Zapata que forman parte de la misma región; Balancán colinda con el estado de Campeche al norte y con Guatemala, al sur, posee un clima cálido-húmedo, cuenta con una superficie territorial de 3 626.1 km^2 por lo anterior es el segundo municipio con más extensión territorial en el estado; su población es de 58 524 habitantes (INEGI, 2022).

Por la diversa vegetación que posee, lagunas, lagos, ríos, zona arqueológica, lo hacen un municipio característico junto con la estación del Tren Maya trajo consigo el desarrollo de una serie de actividades dentro del municipio como la actividad turística, cuenta con 38 rancherías, 48 ejidos, dos villas, seis poblados, tres colonias agrícolas y ganaderas por lo que en su mayoría las actividades que se llevan a cabo son la agricultura, ganadería y pesca, dentro de sus comunidades principales que cuentan con recursos atractivos importantes se encuentran la comunidad de San Pedro, la cual alberga uno de los principales ríos denominado con el nombre de dicha comunidad: San Pedro que es considerado uno de los ríos más limpios del país; reconocido por sus aguas cristalinas y diques que se encuentran a su paso siendo uno de los vestigios mayas importantes del estado de Tabasco, por este lugar atraviesa la Reserva de la Biósfera Wanha', la cual es

un área natural protegida que abarca más de 38 mil hectáreas esta importante reserva alberga un manglar único en el mundo, conocido como mangle rojo, el cual se encuentra en la costa del Río San Pedro; el santuario de las garzas es otro sitio reconocido en esta comunidad, donde se dan lugar estas particulares aves, otra comunidad es Provincia, la cual cuenta con la zona arqueológica de Moral-Reforma y las cascadas con el mismo nombre, donde año con año son visitadas por turistas nacionales y extranjeros, Leona Vicario es otra comunidad importante del municipio, ya que en ella se construyó la iglesia de colores (Iglesia del Señor de Tila), la cual guarda historia y cultura del municipio; además en la misma comunidad se encuentra el santuario de los girasoles una plantación que es visitada por miles de visitantes en las épocas de semana santa en los meses de marzo y abril, de igual forma este lugar cuenta con diversas actividades ecoturísticas como paseos a caballo, recorridos por el río Usumacinta que es uno de los principales ríos del estado, la comunidad Josefa Ortiz de Domínguez es otra comunidad que alberga el santuario del Mono Saraguato donde expertos en el tema llegan a realizar estancias de investigación al igual que el Instituto de Ecología (INECOL) ha llevado a diversos científicos a realizado proyectos de investigación importantes; este santuario alberca importante flora y fauna además de ofrecer servicio de hospedaje al acampar en lugares rodeados de la naturaleza y de las especies características de la zona junto al río Usumacinta; por último se encuentra la comunidad el Naranjito, en ella se encuentra un vestigio nombrado Aguada Fénix, yacimiento arqueológico encontrado en el año 2017 de la cultura maya, es una construcción de las más antiguas de dicha cultura y más grandes (figura 12.1).

La investigación se realizó en 5 comunidades del municipio (San Pedro, Provincia, Naranjito, Josefa Ortiz de Domínguez y Leona Vicario), ya que ellas albergan los recursos turísticos más importantes del mismo; se llevaron a cabo encuestas a visitantes y habitantes; así como se entrevistaron a autoridades municipales para conocer su percepción en el desarrollo de un turismo consciente y responsable; destacando que Balancán al ser un municipio que aún inicia en la actividad turística tiene una gran ventaja, ya que el tipo de atractivos y como aún se está comenzando con el desarrollo de esta actividad; se puede implementar un turismo circular; capaci-

Figura 12.1. *Atractivos turísticos más importantes del municipio de Balancán, Tabasco*

Fuente: elaboración propia.

tando y concientizando a sus pobladores, prestadores de servicios y visitantes.

Para la investigación se recurrió al tipo de investigación mixta, ya que el método cuantitativo es caracterizado por ser exacto, confiable y repetible, mientras que el método cualitativo se enfoca más a comprender fenómenos sociales con interpretaciones de la realidad, con lo anterior cada métodos atiende problemas particulares, existen investigaciones como el caso de esta disertación que se requiere de ambos métodos para tener una visión integral de la realidad que se pretende explicar; por ello ambos métodos se combinan y complementan, el alcance es descriptivo, explicativo; de tipo no experimental, transversal puesto que se busca analizar las dimensiones del desarrollo local, a través de la percepción que tienen los visitantes y los habitantes de las comunidades objeto de estudio; así como de las autoridades municipales, a fin de impulsar estrategias que permitan desarrollar un turismo circular.

El instrumento de recolección de datos utilizado fue el cuestionario, además se recurrió a las técnica de la observación directa y la entrevista dirigida a las autoridades municipales; el cuestionario estuvo conformado por tres apartados con 27 ítems que tenían como objetivo analizar y evaluar las dimensiones sociocultural, económica y medioambiental como parte del desarrollo local enfocado a actividades turísticas; así como del análisis de la participación de habitantes y visitantes en el desarrollo de prácticas sustentables y sostenibles que permitan a las comunidades con recursos turísticos detonar un turismo consciente y responsable; por ello las variables fueron:

- *Dimensión sociocultural.* Fomento a actividades socioculturales, calidad de los servicios municipales, actividades culturales que transmiten riqueza histórica y cultural, participación de la población en actividades turísticas, efecto de la actividad turística en costumbres y tradiciones, interacción con los turistas, instalaciones, servicios, impactos y participación en prácticas responsables.
- *Dimensión económica.* Servicios de hospedaje, alimentos y bebidas, transporte, atención turística, diversificación de actividades, relación precio-servicio, empleos generados, desarrollo de planes enfocados al turismo, calidad de vida.
- *Dimensión medioambiental.* Limpieza de calles y áreas públicas, calidad de los atractivos turísticos, calidad de los servicios turísticos, cuidado y conservación de los atractivos naturales y culturales, actividades de protección, uso de prácticas sostenibles y sustentables, desarrollo local.

El instrumento tuvo una confiabilidad de 0.825 de acuerdo al alfa de Cronbach que conforme a Hernández et al. (2014), la confiabilidad de un instrumento permite conocer el grado en que los resultados de su aplicación sean los mismos a partir del mismo objeto de estudio, reforzando así el grado en que un instrumento sea adecuado a la variable que se desea medir para que el método de medición genere resultados precisos; estuvo validado por el cuerpo académico en consolidación Ciencias Económico-Administrativas ITESLR-CA-2 de la Licenciatura en Administración del instituto Tecnológico Superior de los Ríos.

El tamaño de la muestra en el caso de los habitantes se obtuvo de una población de 3 127 personas, que son el total de personas que habitan las comunidades seleccionadas, con un nivel de confianza de 95% y un margen de error del 5%, se encuestaron a 343 personas entre todas las comunidades. En cuanto a los visitantes, al cuestionario se le agregaron otras variables de estudio como motivos y recursos del viaje, estadía y gastos por lo que estuvo conformado en total por 31 ítems en total; se encuestaron de igual manera con el mismo nivel de confianza y margen de error a 170 visitantes, considerando una población de 300 personas; en las variables adicionales se pudo observar que en su mayoría son turistas nacionales y viajan con familia con la intensión de conocer los atractivos naturales y culturales que posee el municipio.

Por último, la entrevista a las autoridades y agrupaciones turísticas, de igual forma, involucraba las dimensiones descritas con anterioridad y las variables de estudio tenían como finalidad conocer la percepción en cuanto a los servicios turísticos ofrecidos en el municipio, capacitaciones y apoyos brindados; así como conocer el trabajo que realizan en pro del desarrollo local del municipio, desde luego basado en la sustentabilidad y sostenibilidad.

Con todas las técnicas descritas y la metodología se pudo llegar a resultados que permitieron conocer el panorama general de las comunidades en cuanto al desarrollo local y a las prácticas que realizan para lograr un desarrollo sustentable y sostenible, enfocado en un turismo circular, con lo cual, a través de las estrategias y propuestas brindadas se espera tener avances en materia de tener comunidades conscientes y responsables de sus recursos.

Resultados

De acuerdo con los resultados arrojados por el instrumento de recolección de datos a los visitantes y habitantes, así como de las entrevistas realizadas a las autoridades municipales, se tiene acorde a las variables analizadas conforme a la tabla 12.1. se tiene:

Tabla 12.1. *Variables de la investigación acorde a las dimensiones analizadas*

Dimensión sociocultural	*Dimensión económica*	*Dimensión medioambiental*
El turismo trae más beneficios que impactos negativos	Restaurantes	Considera que la limpieza de calles y áreas públicas es:
Las instalaciones del lugar (restaurantes, hoteles, atractivos turísticos, etc.) son adecuadas para el número de visitantes	Hospedajes	Cómo percibe la calidad de los atractivos turísticos
Los turistas interactúan con las personas del lugar	Atención turística	Cómo percibe la calidad de los servicios turísticos
La actividad turística no ha provocado cambios en las costumbres y tradiciones de la población	Diversión de actividades turísticas	Cómo percibe el cuidado y conservación de los atractivos naturales
La población local participa en el desarrollo de las actividades turísticas	Transporte (carreteras, señalamientos)	Cómo percibe el cuidado y conservación de los atractivos culturales
Las actividades culturales transmiten riqueza histórica y cultural del lugar	Relación precio-servicio	Considera que el desarrollo local ha mejorado por las actividades turísticas (más beneficios económicos, medioambientales y sociales)
La calidad de los servicios municipales ha mejorado gracias a las actividades relacionadas con el turismo	Empleo generado por el turismo	Se realizan prácticas sustentables y sostenibles
El gobierno se preocupa más por la localidad, al fomentar actividades socioculturales	Desarrollo de planes turísticos	
En la(s) comunidad(es) se desarrollan actividades de protección y conservación de los recursos naturales o culturales	La actividad turística puede aumentar la calidad de vida	

Fuente: elaboración propia.

Habitantes

En lo que respecta a los habitantes, consideran que es prioridad fortalecer la infraestructura, lo cual comprende mejoras en la accesibilidad a los diferentes atractivos, la calidad de los servicios turísticos, como el hospedaje, alimentación, transporte; así como los servicios públicos básicos como energía eléctrica, agua potable, internet; ya que en algunas comunidades se ven afectadas por estos servicio básicos; impulsar mejores y más estrategias de diversificación de actividades turísticas para la satisfacción del visitante por

el tipo de turismo a desarrollar; aunque están conscientes que aún el municipio empieza a trabajar en aras de impulsar la actividad turística en el mismo; ya que su economía estaba basada en actividades como la agricultura, ganadería y pesca. Los habitantes contribuyen con el cuidado y conservación de los atractivos naturales y culturales, lo cual ayuda al cumplimiento efectivo de conocer y reconocer el valor de estos atractivos turísticos, por lo que se pudo percibir el aprovechamiento adecuado en el cuidado y conservación de los mismos, destacando que en todas las localidades se encuentran en un buen estado, hay un respeto a sus costumbres y tradiciones, considerando que el turismo ha traído beneficios e impactos positivos lo cual es un indicador importante para la satisfacción del turista, además de una cultura de respeto y cuidado, la interacción que tiene con ellos es buena, ya que estas comunidades se caracterizan por ser gente amable, atenta y con espíritu de servicio; sin embargo reconocen que es necesario el desarrollo de cursos de capacitación para mejorar la atención a los turistas así; como desarrollar estrategias de ventas para la comercialización de los productos típicos que elaboran en cada una de ellas, ya que hay producción de algunos alimentos como maíz, sandía, chigua, árboles frutales y maderables, productos del programa denominado Sembrado Vida, programa del gobierno del estado y federal que ha traído derrama económica al comercializar esos frutos y utilizarlos de igual manera para consumo; se visualiza un área de oportunidad de poder transformarlos al agregarles valor pudiéndose comercializar en las actividades turísticas. Es así como comercio justo se visualiza como una práctica basada en los términos del estudio ya que este permitirá dar salida a los productos de forma competitiva y equitativa en su esquema comercial y en la mitigación del cambio climático a través de la reforestación de zonas degradadas, que es lo que hace el programa de sembrando vida, ya que es uno de sus principales objetivos; por ello los habitantes mostraron disponibilidad para la realización de prácticas sostenibles y sustentables iniciando con la identidad y el patrimonio cultural, costumbres y tradiciones que tiene muy arraigadas y que el turista que los visita se va impregnado de ella, de la cultura y gastronomía tan típica del lugar y, sobre todo de la manera artesanal en la que elaboran cada uno de los productos que ofertan, hay de igual forma acercamiento entre productores y artesanos lo que facilita el desarrollo y mejoras en los pro-

ductos, hay sensibilización y conservación medioambiental tal es el caso del poblado San Pedro en el que habitantes y centros educativos trabajan de la mano para la conservación del mangle rojo en el río San Pedro, ya que se han realizado estudios que muestran los beneficios y bondades que trae al medio ambiente por lo que se ha iniciado una campaña de reforestación y cuidado del mismo; asimismo las demás comunidades trabajan junto con las agrupaciones turísticas para organizar algunos eventos; limpieza de ríos, calles y parques; ya que son otros de los temas a atender por la municipalidad. Tienen conocimiento de lo que implica desarrollar prácticas sustentables y sostenibles, aunque es indispensable la creación de cursos, foros, pláticas o charlas con temáticas de educación ambiental a la población local, de la importancia del cuidado y preservación de los recursos en el tenor de que los visitantes entren en esa sintonía y pueda desarrollarse un turismo consiente y responsable, con conciencia turística; se requiere de desarrollar planes enfocados al turismo por parte de autoridades municipales, empresarios, ya que en ese indicador en los resultados la calificación fue baja y se hace necesario para el crecimiento turístico pues a la fecha aún en las comunidades no se han reflejado estrategias lo suficientemente integradoras para impulsar un desarrollo local sustentable, así como sostenible que enmarque en el bienestar y calidad de vida de las comunidades, sin embargo, podemos ver otros aspectos y áreas de oportunidad que se han alineado de manera efectiva para impulsar el turismo circular.

Visitantes

En cuanto a los visitantes a través de este estudio se encontraron aspectos relevantes de las expectativas y satisfacción de los mismos en cuanto al destino turístico; así como la importancia del desarrollo de prácticas sustentables y sostenibles por lo que en las tres dimensiones se tienen que dentro de la dimensión socio-cultural se resalta la calidad en los servicios y atractivos turísticos esto en las instalaciones del lugar y su adecuación para el número de visitantes, de igual forma el respeto que muestran los visitantes a los sitios naturales, culturales; así como a las costumbres y tradiciones es de suma importancia para el desarrollo de prácticas entorno a la susten-

tabilidad y sostenibilidad; la seguridad ciudadana es un componente básico para el turista y en la evaluación lo consideran bueno; ya que la comunidad no representa un riesgo para el visitante, en cuanto a la dimensión económica, como el municipio se encuentra aún en desarrollo del sector turismo se requiere del progreso de planes y estrategias que permitan un crecimiento económico para las familias balancanenses como la formación de guías turísticos, desarrollo de más actividades en el sector y fortalecimiento de las existentes, creación de empresas en este sector como hoteles, restaurantes, etc., que mejoren la calidad de vida de los habitantes; los visitantes están de acuerdo en apoyar al consumo de productos locales y de servicios turísticos que impulsen a un desarrollo sostenible y sustentable en la zona lo que es una fortaleza para el municipio, respecto a la dimensión medioambiental es necesario un aprovechamiento racional en los recursos naturales y atractivos que posean un potencial importante en un contexto turístico, los visitantes muestran interés en contribuir de manera positiva al cuidado y conservación de los atractivos culturales y son un factor de acuerdo a los resultados de elección a la hora de decidir el destino a visitar, además de que regresen y lo recomienden; por ello están de acuerdo en apoyar a empresas que tengan certificaciones que garanticen la protección de los recursos; así como del patrimonio natural y cultural.

Algunas de las prácticas en temas de sustentabilidad y sostenibilidad que se observaron por los visitantes del municipio son: el apoyo en la compra de productos y servicios locales, participación en eventos culturales, respeto a las costumbres y tradiciones de la localidad, mencionan que de igual forma buscarían alojamientos que cuiden el entorno natural y cultural, uso de transportes limpios o más amigables con el medio ambiente, correcta disposición de los residuos, usando correctamente las basuras de reciclaje y orgánicos, hábitos de consumo, procurando el ahorro de agua y energía; así como el respeto por las indicaciones en reservas naturales y áreas protegidas, contribuir a la conservación, protección de los lugares visitados, cargar un recipiente para guardar la basura, el uso de protectores solares que no dañen los ríos; así como repelentes ecológicos, comparten información sobre el viaje y prácticas sostenibles; esta última es de vital importancia para futuros visitantes y son prácticas que se deberán impulsar en los destinos turísticos. En general las mejoras que se puedan

realizar de acuerdo a resultados de las encuestas aplicadas a los visitantes se tienen:

- Mejora de la calidad de los servicios: transporte público, servicios públicos básicos, servicios turísticos, oferta cultural y de entretenimiento.
- Mayor atención a la sostenibilidad y sustentabilidad: implementar prácticas y políticas que minimicen el impacto ambiental y maximicen los beneficios para la comunidad local.
- Mayor inclusión de la comunidad local: fomentar la participación ciudadana en la planificación y gestión del turismo.
- Mejor comunicación y promoción: comunicar de manera efectiva las acciones que se están llevando a cabo y promover los atractivos turísticos de Balancán.
- Atención al cuidado y preservación siempre de los atractivos naturales y culturales; evitando la contaminación de ríos, lagos, lagunas: investigar, monitorear y mitigar los niveles de contaminación en el municipio.
- Atención a la accesibilidad de los destinos turísticos: crear e implementar medidas para que las personas con discapacidad puedan tener acceso a los lugares turísticos del municipio.

Autoridades municipales

Con respecto a la apreciación de las autoridades sobre los factores que propician o limitan el desarrollo local en el tema de turismo en el municipio, se puede percibir de acuerdo a los resultados, que los factores en los que ellos ven un impulso dentro de la dimensión sociocultural está que el turismo trae más beneficios que impactos negativos, la calidad de los servicios municipales ha mejorado gracias a las actividades relacionadas con el turismo, que en estos momentos está siendo observada por los tres niveles de gobierno al ser paso del tren Maya; sin embargo se requiere de mejoras, en la dimensión económica se identificaron que los factores de desarrollo turístico por parte de los prestadores de servicios son los restaurantes, las

buenas prácticas sustentables y sostenibles, también se puede destacar el factor relación precio-servicio; en los cuales se observa que están conscientes que deben impulsar programas que permitan a los empresarios mejorar sus servicios o productos, al igual que es importante capacitarlos para que los visitantes puedan tener experiencias memorables, únicas; diversificar la actividad turística, crear más actividades de acuerdo al tipo de turismo desarrollado, esto permitirá de igual forma la generación de más y mejores empleos a las comunidades, un factor importante es la infraestructura de carreteras la cual sale con calificativo negativo, lo que representa un limitante para el desarrollo del sector turístico en los que se tendrá que poner atención emergente por parte de las autoridades para tener una corresponsabilidad compartida en el desarrollo del municipio.

En la dimensión medioambiental de igual manera se tratan los factores de cuidado hacia el medio ambiente con acciones de limpieza, calidad, conservación en los atractivos y servicios naturales y culturales, así mismo en el desarrollo de buenas prácticas sustentables y sostenibles en los espacios turísticos, que se obtuvieron resultados en general como buenos, ya que mencionan que hay programas de limpieza de ríos, de parques y de atractivos en las diversas comunidades que junto autoridad con habitantes se organizan para llevarlas a cabo; sin embargo es necesario trabajar en el empoderamiento del rescate de todos los recursos naturales con los que cuenta el municipio y en especial con los atractivos turísticos en las comunidades; para crear esa cultura del cuidado y respeto; así como el desarrollo de planes turísticos que elevan la calidad de los atractivos en general y enfocados al desarrollo local sustentable y sostenible del municipio, involucrando a todos los actores, habitantes, visitantes, autoridades, empresarios e instituciones de educación para mejores resultados.

Discusión

De acuerdo con autores como Kisman y Tasar (2014), la finalidad del desarrollo local es construir la capacidad del territorio definido, para mejorar el futuro económico y la calidad de vida de sus habitantes, por lo que conforme a ello el desarrollo local puede contribuir en gran medida al rendimien-

to económico; asimismo García et al. (2015) afirman que el desarrollo local se basa en premisas como la amplia y activa participación de la población en el rescate de los niveles productivos necesarios; así como la identificación de los recursos disponibles para su utilización más eficaz, y así contar con proceso participativo que permita abordar y resolver problemas sociales y económicos que se presentan en la comunidad, influyendo directamente en la calidad de los servicios y productos que se ofrecen al visitante o turista; el desarrollo local va de la mano con el turismo circular ya que este tiene como objetivo orientar el desarrollo de prácticas que protejan el patrimonio cultural y el medio ambiente de la comunidad anfitriona, brindando al turista una experiencia única, autentica, más responsable y consciente, por lo anterior genera la necesidad de nuevas inversiones, como la adecuación o construcción de instalaciones turísticas alojamientos, alimentos, centros de servicios, entretenimiento, infraestructuras de transporte, entre otros, a fin de impactar en la protección de los recursos naturales, patrimoniales, culturales, en el suministro de agua, energías renovables, reducción de la contaminación, etcétera.

Diversas investigaciones en este tema sugieren que para implementar un turismo circular se deben desarrollar prácticas enfocadas en la gestión eficiente de residuos, recursos como el agua, energía, uso de energías renovables, economías locales, así como la digitalización para reducir el consumo, lo cual implica la reutilización, intercambio y reciclaje de dichos recursos; por ello, al analizar las diversas dimensiones y conocer la situación actual de esas comunidades; se generan alternativas y estrategias que darán soporte al desarrollo de las comunidades que deseen un crecimiento turístico sostenible y sustentable, donde es claro que se debe de afianzar un cambio estructural de la forma de hacer economía en las mismas, dejando la autenticidad del espacio físico, tradiciones y costumbres de los pobladores, en donde la producción debe de reincidir en las empresas locales, utilizando los recursos de manera eficiente, generar economía de escala, así como mejorar la competitividad en el mercado turístico. En la dimensión sociocultural buscar un entendimiento entre las partes de la producción que genera riqueza, siendo los anfitriones como sociedad local los principales, incluyendo a los turistas, autoridades, donde se busque promover los valores éticos como la conservación del patrimonio en costumbres,

tradiciones y gastronomía local que dan identidad a los lugares para tener bases del proceso para el desarrollo que se desea en las comunidades, aquí en esta dimensión es de vital importancia el considerar la parte política y gestora donde las propuestas, planes, estrategias y acciones por parte de las autoridades de apoyo impulsen un crecimiento que permitan lograr los requerimientos para el desarrollo sustentable y sostenible de los ODS.

Los prestadores de servicios o empresarios locales deben de aceptar la migración hacia las nuevas formas de trabajo con el uso de las tecnologías mediante la adquisición equipos y maquinaria de innovación, así mismo apostarle a la capacitación, competitividad del mercado laboral y empresarial; y la parte de las autoridades de poner atención a los problemas prioritarios del tejido social y empresarial local de las comunidades, ejecutando acciones de fomento económico en dichos lugares donde se considere la participación de los actores involucrados desde la detección de necesidades, diseño de estrategias e implementación de acciones de progreso territorial.

En la dimensión medio ambiental es crucial para el desarrollo de las comunidades y del sector turístico del municipio dado que los actores involucrados deben de atender la elaboración de productos socialmente amigables con el medio ambiente, trabajar en reducir y caminar hacia la eliminación del uso de materiales que atenten contra la naturaleza, minimizando o erradicando por completo el uso de insumos o materias primas tanto en uso interno o externo de las instalaciones para los distintos procesos productivos, gestores, administrativos y en uso de todas las actividades del capital humano involucrado, aunada a estas se pueden realizar otras más como revisar las acreditaciones de sustentabilidad y sostenibilidad de las empresas y operadores a fin de escogerlas para disfrutar el destino, eligiendo operadores éticos que tengan condiciones laborales dignas, que apoyen a la comunidad anfitriona y promuevan el cuidado de los recursos naturales, denunciar prácticas como la explotación laboral o el maltrato animal, reducir el consumo de plásticos, uso de transportes sustentables y el consumo de productos locales. Por otro lado, también se debe de organizar con las autoridades y todas las instancias posibles la inversión en restauración, mantenimiento en los distintos tipos de recursos (naturales, culturales y patrimoniales). En esta dimensión, promover el

uso de las energías limpias, cumplir con las buenas prácticas sustentables y sostenibles en cada espacio del sector y cadena productiva.

En relación con la dimensión económica se debe trabajar en la mejora de los servicios turísticos e infraestructura del municipio (carreteras, energía eléctrica, luz y agua, hoteles, restaurantes, transporte); hay que difundir más las actividades y destinos turísticos del mismo por parte de las autoridades y empresarios o prestadores de servicios, es necesario la orientación al turismo con respecto a horarios, transportación, servicios como hoteles y restaurantes; por lo que se sugieren módulos de atención al visitante en puntos estratégicos del municipio; promover las capacitaciones de los diferentes actores involucrados en el desarrollo de la actividad turística en el municipio para sumar actitudes, aptitudes, competencias y habilidades, logrando competitividad y fortalecimiento en el emprendimiento turístico del municipio robusteciendo la economía local.

Estas prácticas coadyuvarán a desarrollar un entorno amigable con el medio ambiente, logrando consolidar un turismo más responsable; enfocado en el turismo circular, desde luego tienen que ser implementadas por todos los actores para el éxito en el destino turístico.

Conclusiones

Las estrategias que se tienen para impulsar un turismo responsable y consciente de acuerdo a la evaluación realizada en las comunidades rurales del municipio de Balancán que aunada con las prácticas impactarán en el desarrollo local del municipio; así como en un turismo circular son:

- *Planificación y gobernanza local.* La participación activa de la comunidad es fundamental en la planificación del turismo y el desarrollo local. Involucrar a los residentes en la toma de decisiones no solo garantiza que se respeten sus intereses, sino que también fomenta un sentido de propiedad sobre los proyectos turísticos. La creación de cooperativas locales puede ser una herramienta eficaz para asegurar que los beneficios se distribuyan equitativamente y que las decisiones reflejen las necesidades de la comunidad (Mercado de la Cosecha,

2024). En el municipio de Balancán hay dos Nodos de Economía Social y Solidaria (NODESS), estos son alianzas de integración voluntaria conformadas por al menos tres actores, con el fin de desarrollar ecosistemas de economía social y solidaria en sus territorios, a través de los cuales se propongan, diseñen e implementen soluciones territoriales a necesidades colectivas. El NODESS de Los Ríos de Tabasco y el NODESS Red de Juventudes y Cooperativistas del Usumacinta, quienes trabajan con emprendimientos colectivos, artesanos y prestadores de servicios en el municipio de Balancán, les brindan asesoría técnica y apoyan para que se conformen cooperativas orientadas en la economía social y solidaria y se integran paulatinamente los grupos que forman parte de las Comunidades de Aprendizaje Comunitario del programa Sembrando Vida. Desarrollar planes de acción y de desarrollo enfocados al turismo, es necesario igual el control y registro de los prestadores de servicios relacionados con el sector turismo, para la buena planificación turística.

- *Diversificación de la oferta turística.* Es esencial diversificar las actividades turísticas para atraer a diferentes tipos de visitantes, al ofrecer una gama variada de experiencias, las comunidades pueden reducir su dependencia de un solo tipo de turismo y maximizar su potencial económico, evitando la concentración en áreas específicas, lo que permite una distribución más equitativa de los beneficios económicos. En el municipio de Balancán se ofertan diversos tipos de productos y servicios turísticos, desde experiencias memorables en la visita al santuario de girasoles, torneos de pesca sustentable de especies como el robalo, actividades agroturísticas y cuidado del medio ambiente como la estación primatológica del mono saraguato o santuario del mono saraguato, visita a zonas arqueológicas y destinos turísticos naturales como las cascadas de Reforma, santuario de las garzas, río San Pedro y el área natural protegida reserva de la biósfera Wanha', así como ecoturismo a ranchos ganaderos y agrícolas que brindan experiencias no se oferta en las ciudades; ampliar los módulo de información turística, difusión del destino por medio de plataformas nacionales e internacionales, además de la participación en eventos de gran relevancia, implementar dentro de diversificación rutas de recorrido don-

de se incluyan establecimientos locales como las queserías para disfrutar de su producto distintivo como es el queso de poro y visita a las fábricas de tostadas de pozol.

- *Prácticas sostenibles.* Es crucial para minimizar el impacto ambiental del turismo. Esto implica desde la gestión adecuada de residuos hasta el uso eficiente de recursos y la conservación de ecosistemas locales. Las iniciativas sostenibles no solo protegen el entorno, sino que también atraen a turistas interesados en experiencias responsables. Se tienen diversas estrategias orientas a la sustentabilidad en el municipio de Balancán, Tabasco, por ejemplo: no utilizar bolsas de plástico en los establecimientos y que en instituciones gubernamentales no se utilicen desechables de unicel o plástico. Se declaró como área natural protegida (ANP) a la reserva de la biósfera Wanha' ubicada en el río San Pedro, de igual manera en la estación primatológica del mono saraguato se realizan actividades orientas al cuidado y preservación de la especie; todas estas acciones buscan que el turista que llegue a las comunidades rurales cuide y preserve el ecosistema, costumbres, tradiciones y respeto a sus culturas; así como las ya mencionadas anteriormente en cada una de las comunidades. Dentro del proyecto se tuvieron residentes que trabajaron de la mano con el ayuntamiento municipal y con una empresa dedicada a brindar asesorías especializadas a las comunidades para el mejor manejo de los cultivos, del uso de recursos; las cuales apoyaron al proyecto a brindar capacitaciones a los habitantes para el desarrollo de buenas prácticas con enfoques en sustentabilidad.
- *Desarrollo de infraestructura sostenible.* Que cumpla con criterios de sostenibilidad, incluyendo el uso eficiente de recursos y la preservación del patrimonio cultural y natural. Esto se logra a través de un diagnóstico que sigue el proceso que se cita a continuación: Identificación de necesidades locales, Fomento de la innovación y tecnología; la adopción de soluciones tecnológicas innovadoras puede superar barreras geográficas y logísticas. Por ejemplo, energías renovables: implementar sistemas de energía solar o eólica para garantizar un acceso sostenible a la electricidad; tecnologías de información: mejorar la conectividad digital, lo que permite a las comunidades acceder a información y

mercados más amplios, desarrollo Humano Integral: es vital enfocarse en mejorar la economía local, fomentar el emprendimiento y la capacitación para generar empleo, así como mejorar educación y servicios de salud; la inversión en infraestructura básica como caminos, sistemas de agua potable y energía es esencial. Estas inversiones no solo mejoran la calidad de vida, sino que también facilitan el acceso a mercados y servicios, promoviendo el desarrollo económico; promoción del turismo de naturaleza, rural de aventura, inclusión social y participación comunitaria es importe involucrar a las comunidades en la toma de decisiones sobre sus recursos es fundamental. Esto no solo fomenta un desarrollo más equitativo, sino que también asegura que las soluciones sean adaptadas a las realidades locales y sostenibilidad ambiental; implementar prácticas que respeten el medio ambiente es crucial. Como la gestión eficiente de recursos naturales; promoviendo la agricultura sostenible y la conservación de biodiversidad, infraestructuras verdes, diseñando proyectos que minimicen el impacto ecológico y promuevan el uso responsable de los recursos.

- *Promoción del turismo social.* Implementar políticas públicas que favorezcan el turismo social e inclusivo, promoviendo la vinculación entre comunidades locales, pueblos indígenas y empresas turísticas. Con los proyectos gubernamentales como el Tren Maya, se destacan y promueven destinos, productos y servicios turísticos que se ubican en comunidades con afluencia de este proyecto, se promocionan en la página web y está en proceso la creación de paquetes turísticos que involucre visitas a comunidades rurales, transportándose en el tren maya y enlazando servicios con prestadores de servicios de las comunidades que se visitan.
- *Integración interinstitucional.* Promover la colaboración entre diferentes niveles de gobierno y sectores para implementar acciones coordinadas que impulsen un turismo sostenible. El proyecto de investigación lo desarrollan los miembros del Cuerpo Académico en Consolidación ITESLR-CA2 Ciencias Socioeconómico Administrativas registrado ante PRODEP y adscrito al TecNM-Instituto Tecnológico Superior de Los Ríos, en colaboración con instancias de Gobierno Federal, estatal y

municipal de Turismo, así como Redes de Turismo y participación de agrupaciones turísticas y cámaras empresariales del municipio.

- *Capacitación y concienciación.* Desarrollar programas de capacitación para los actores del sector turístico que incluyan temas de sostenibilidad y concientizar tanto a turistas como a residentes sobre prácticas sostenibles. Se trabaja en un modelo de capacitación dirigido a prestadores de servicios, artesanos que se ubican en las comunidades rurales que se visitan y se busca sensibilizar el turismo responsable y consciente entre habitantes, empresarios y turistas, así como creación de foros con temáticas de educación ambiental a la población local.
- *Conservación del medio ambiente.* Implementar estrategias para la conservación de ecosistemas y la biodiversidad, así como para la reducción de residuos generados por la actividad turística. El municipio de Balancán se caracteriza por lugares que cuidan y preservan a vidas silvestres, tal es el caso del Santuario de las Garzas ubicado en el Poblado de San Pedro, también se encuentra la Estación Primatológica del mono saraguato. Los cuidados y preservación de estas especies se realizan por parte de los habitantes de las comunidades, quienes colaboran con instituciones educativas de la región Ríos de Tabasco que cuentan con especialistas de estas especies silvestres, como el Instituto Nacional de Ecología (INECOL), que colabora con la Estación Primatológica del mono saraguato o la UJAT DAMRÍOS que colabora con el delegado del poblado San Pedro para el cuidado del Santuario de las Garzas y la reserva de la biósfera Wanha'.
- *Generación de empleo local.* Crear oportunidades laborales en las comunidades locales a través del desarrollo turístico, asegurando que una mayor parte del gasto turístico beneficie a la economía local. Se fomenta la integración de los emprendimientos colectivos en cooperativas legalmente constituidas, así como la profesionalización de prestadores de servicios, empresarios de empresas turísticas y artesanos que se ubican en las comunidades rurales y en donde se busca fomentar el turismo responsable y consciente.
- *Fortalecimiento del marco normativo.* Establecer y fortalecer normativas que regulen el uso turístico de áreas naturales protegidas y otros recursos, garantizando un uso responsable y sostenible. El declarar

como área protegida natural (ANP) la reserva de la biósfera Wanha' es un gran avance para los destinos turísticos naturales con los que cuenta el municipio. Aún falta una cultura del cuidado y preservación de estos destinos turísticos, ya que se deterioran lugares como las cascadas de Reforma, el río San Pedro que se caracteriza por tener el agua más limpia y que cuenta con flora como el mangle rojo, que no es típico de estos lugares.

El éxito del turismo responsable y consciente, a través del turismo circular en el municipio de Balancán, depende de un enfoque equilibrado que combine crecimiento económico con sostenibilidad ambiental y cultural. Las comunidades con recursos turísticos deben mantener el control sobre sus recursos y decisiones turísticas para evitar la sobreexplotación y asegurar que las generaciones futuras puedan disfrutar de su patrimonio natural y cultural.

Referencias

Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science, 2*(1), 133-140.

Arévalo, G. (2020). *Modelos turísticos y desarrollo sustentable: Análisis teórico.* https://ru.iiec.unam.mx/5123/1/1-003-Arevalo.pdf

Gascón, J. (2018). El turismo responsable y su relación con las comunidades locales: Un análisis municipal. *Revista Internacional de Sostenibilidad Turística, 12*(1), 23-38. https://doi.org/10.1016/j.rist.2018.001

García, A., Serrano, R., Osorio, M. y López, E. (2015). Percepción de la comunidad en torno al turismo como factor de desarrollo local. Caso San Pedro, Tultepec, México. *Turismo y Sociedad,* 43-65.

González S. (2021). Discursos y prácticas del ejercicio del Yeknemilis (Buen vivir) en la Unión de Cooperativas Tosepan, Sierra Nororiental de Puebla, México. En B. Marañón (Ed.), *Economías alternativas y buenos vivires, el debate* (pp. 233-254). Universidad Nacional Autónoma de México.

Goodwin, H. (2011). *Taking responsibility for tourism.* Goodfellow.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2014). *Metodología de la Investigación.* McGraw-Hill.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2022). *Anuario de estadísticas por entidad federativa.*

Kisman, Z. A. y Tasar, I. (2014). Los elementos clave del desarrollo local. *Procedia Economics and Finance, 15,* 1689-1696. https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00642-X

López Ceballos, V. A. (2023). *El desarrollo del turismo comunitario por medio del Impulso de la cultura en la comisaría de Dzityá, Yucatán* [Tesis para obtener el grado de maestra en Planificación de Empresas y Desarrollo Regional]. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Mérida. https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/7151/1/LOPEZ-23-EL%20DESARROLLO%20DEL%20TURISMO%20COMUNITARIO.pdf

Organización Mundial del Turismo (OMT). (2019). *Tourism and the sustainable development goals.* https://www.unwto.org/

Organización Mundial del Turismo (OMT). (2023). *Tendencias globales en el turismo: Informe anual 2022.*

Martínez, F. y Pérez, V. (2021). Turismo y sostenibilidad: Nuevas perspectivas para la gestión de destinos. *Journal of Sustainable Tourism, 29*(4), 78-95. https://doi.org/10.5678/jst.2021.29.4.78

Ruiz, E. (2017) Claves del turismo de base local. Presentación. *Gazeta de Antropología, 33*(1), art. 00. https://hdl.handle.net/10481/44359

Sánchez, D. (2024). Tendencias del turismo responsable en los destinos estatales. *Turismo y Desarrollo Sostenible, 18*(1), 122-138. https://doi.org/10.2345/tds.2024.18.1.122

Scheel, C. y Aguiñaga, E. (2016). *La economía circular, una alternativa a los límites del crecimiento lineal.*

Secretaría de Turismo (Sectur). (2024). *Resultados de la actividad turística mayo 2024.* https://www.datatur.sectur.gob.mx/RAT/RAT-2024-05(ES).pdf

Secretaría de Turismo (Sectur). (2025). *Gira por el estado de Tabasco* (Comunicado 027/2025). https://www.gob.mx/sectur/articulos/la-secretaria-de-turismo-de-mexico-realiza-gira-por-tabasco

Secretaría de Turismo (Sectur). (2025). *Aumento del número de pasajeros en vuelos* (Comunicado 041/2025). https://www.gob.mx/sectur/articulos/secretaria-de-turismo-en-enero-de-2025-aumenta-5-5-el-numero-de-pasajeros-transportados-en-vuelos-nacionales-e-internacionales

Tercera Parte

ECONOMÍA CIRCULAR Y EL AGUA: CLAVE PARA LA SOSTENIBILIDAD MEXICANA

13. Economía circular y reciclaje del agua en viviendas de Pachuca, Hidalgo*

Sergio Gabriel Ceballos Pérez[1]
Gabriela Alejandra Vázquez Rodríguez[2]
Alfredo Bigurra Alzati[3]
Liliana Lizárraga Mendiola[4]
Miguel Ángel Torres González[5]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.13

Resumen

Es un hecho que la escasez de agua está aumentando día con día; el crecimiento poblacional, la producción masiva, el consumo desmedido, y los efectos del cambio climático han incrementado la presión sobre este recurso vital. En 2021 la ONU-Hábitat publicó que el consumo promedio per cápita en México es de 366 litros al día, sin contar el agua virtual proveniente de los productos que consumimos, mientras que el consumo promedio en países desarrollados como Estados Unidos alcanza los 575 litros al día. Aun así, el consumo promedio de agua de los mexicanos se encuentra arriba del consumo recomendado que es de 96 litros al día. Los hogares son

* Este capítulo se desarrolló en el marco de colaboración entre Cuerpos Académicos de la Red de Infraestructura Verde y Urbanismo Sustentable. No se contó con ningún financiamiento público para ello, ni se tiene ningún conflicto de interés entre los participantes.

[1] Doctor en Economía. Investigador por la Universidad Politécnica de Pachuca, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4991-3540

[2] Doctora en Microbiología-Biotecnología. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8351-8451

[3] Doctor en Arquitectura. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9740-9483

[4] Doctora en Ciencias de la Tierra. Profesora-investigadora de tiempo completo en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6320-8923

[5] Doctor en Planeación Estratégica y Gestión de la Tecnología. Profesor-investigador de tiempo completo de la Universidad Politécnica de Pachuca, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9695-6610

uno de los espacios donde el agua es un recurso vital y donde la economía circular puede contribuir a un mejor uso y diseño de nuevas formas de reutilización y reciclaje del agua mediante la filtración, separación, biodigestión, entre otros procesos combinados, con el fin de darle un tratamiento para construir un modelo de economía circular del agua a nivel de vivienda. Este capítulo tiene como objetivo analizar la posibilidad de reciclar agua a nivel doméstico y tener una aproximación de la proporción de agua que se puede ahorrar mediante economía circular.

Palabras clave: *reciclaje de agua, hogares, economía circular, infraestructura verde.*

Introducción

Uno de los principales desafíos socioambientales del siglo actual es la crisis hídrica, la cual se agudiza entre otras cosas, por el crecimiento demográfico, el cambio climático, la pobre cultura sobre el cuidado del agua y el manejo ineficiente del recurso. Alrededor de dos mil millones de personas en el mundo viven en regiones con escasez hídrica, lo que compromete no solo la salud pública, sino también la estabilidad de los ecosistemas y la seguridad alimentaria (Liu et al., 2021). En zonas urbanas, esta problemática se agudiza por el aumento continuo de la demanda de agua para consumo en el hogar y la baja eficiencia en el tratamiento y reúso del agua residual, particularmente en zonas del Sur Global (Lakho et al., 2023).

La situación en México no es distinta, ya que la presión sobre los recursos hídricos es elevada: cerca del 76% del agua se destina a la agricultura, mientras que el sector doméstico consume alrededor del 10% (INEGI, 2024). Este alto consumo se relaciona estrechamente con las prácticas de crecimiento urbano y su consecuente infraestructura. En Hidalgo, el 95.7% de las viviendas cuenta con acceso a agua potable, aunque aproximadamente 133 mil personas, en su mayoría de localidades rurales, carecen aún de este servicio (Conagua, 2022). La situación en Pachuca refleja esta dualidad: aunque presenta una cobertura elevada en servicios de agua potable y drenaje, el manejo de las aguas residuales es deficiente: solo el 67.7%

de las plantas de tratamiento operan efectivamente, lo que facilita condiciones de escasez hídrica y la dependencia de la temporada de lluvias (GEH, 2023).

La escasez hídrica no solo se asocia con la falta de disponibilidad del recurso, sino también con su mala gestión, especialmente del agua residual generada en los hogares. Las aguas grises (provenientes de lavamanos, regaderas, lavadoras) representan una fracción significativa del consumo doméstico que puede ser tratada y reutilizada, contribuyendo a disminuir la presión sobre fuentes potables. A pesar de su potencial, diversos estudios destacan la insuficiente implementación de sistemas de reúso doméstico y la falta de normativas técnicas específicas como barreras relevantes (Al Jahmani et al., 2022; Liao et al., 2021).

Este contexto se agudiza durante eventos de sequía prolongada, como los registrados entre 2019 y 2022 en el centro de México, los cuales han evidenciado la vulnerabilidad de las ciudades a fenómenos climáticos extremos. Ante situaciones como esta, se requieren soluciones descentralizadas y resilientes que ayuden a reducir la dependencia de las fuentes de abastecimiento convencionales, limitar el consumo de agua potable, mejorar la eficiencia en el tratamiento desde la fuente y enfocarse hacia un modelo de economía circular en el ámbito urbano. Existen tecnologías como muros verdes, filtros cerámicos, sistemas de captación pluvial y humedales artificiales (entre otras) de escala doméstica, las cuales han demostrado ser viables en contextos urbanos con alta presión hídrica (Torkashvand et al., 2023; Liao et al., 2021).

A partir la revisión de literatura reciente relacionada con estos temas, se identifican vacíos relevantes en cuanto al diseño, viabilidad técnica y evaluación del desempeño de soluciones domésticas para el tratamiento de aguas grises en países como México, donde aún prevalecen enfoques centralizados y poco adaptativos. Esta investigación busca atender dichos vacíos mediante la propuesta de un sistema doméstico de tratamiento de aguas grises, capaz de integrarse a la vivienda urbana promedio y reducir tanto el consumo de agua potable como las emisiones contaminantes generadas por el vertido sin tratar.

El objetivo de este estudio es proponer un diseño e identificar los componentes óptimos de un sistema doméstico de tratamiento de aguas grises

que permita su reúso eficiente, disminuya el consumo de agua potable y promueva una gestión sostenible del recurso desde una perspectiva de economía circular.

Marco teórico

La economía circular (EC) ha emergido como una estrategia clave para redefinir los modelos de producción y consumo en diversos sectores. En el marco del recurso hídrico, la EC promueve una visión regenerativa mediante el reúso, reciclaje y valorización del agua residual, reduciendo así la presión sobre fuentes convencionales y atenuando los impactos ambientales derivados de su sobre extracción (Geissdoerfer et al., 2017; Kirchherr et al., 2017).

Si bien el término formal de EC es propuesto por Pearce y Turner (1989), quienes sugirieron sustituir el modelo lineal "tomar-usar-desechar" por uno circular, diversos autores han señalado que sus principios ya se tomaban en cuenta en prácticas tradicionales como la reparación, el reaprovechamiento y la extensión de la vida útil de bienes (Negrei e Istudor, 2018; Morseletto, 2020). Aplicada al ámbito del agua, la EC implica cerrar los ciclos hídricos por medio de estrategias que prioricen la eficiencia en el uso, la recuperación desde la fuente y la reintegración confiable de aguas residuales al entorno urbano o productivo (Calisto et al., 2021).

Tratamiento de aguas grises en viviendas mediante opciones sostenibles

Respecto al tratamiento de aguas grises se han desarrollado y adaptado distintas tecnologías para contextos domésticos; estas toman en cuenta criterios como eficiencia técnica, adaptabilidad espacial, facilidad de mantenimiento y rentabilidad. Los estudios recientes destacan las siguientes (tabla 13.1).

Estas tecnologías se alinean con los principios de EC al facilitar el reúso eficiente del agua gris; también, promueven ahorros significativos en el

Tabla 13.1. *Principales tecnologías de tratamiento del agua gris*

Tecnología	*Eficiencia tratamiento*	*Adaptabilidad*	*Mantenimiento*	*Usos recomendados*	*Autores*
Filtros cerámicos y de arena	Alta (70-90%)	Alta	Bajo	Riego, descarga sanitaria	Al Jahmani et al., 2022
Muros verdes	Media (50-70%)	Media	Bajo	Riego ornamental	Lakho et al., 2023
Humedales construidos (SSF/VFCW)	Alta (> 90%)	Alta	Bajo-medio	Riego, sanitarios, limpieza	Lakho et al., 2023
Biorreactores de membrana (MBR)	Muy alta (> 95%)	Media	Medio	Todos los usos no potables	Baykal, 2019
Captación + tratamiento combinado	Alta	Alta	Variable	Suplemento pluvial y sanitario	McCarton et al., 2022

Fuente: elaboración propia.

consumo de agua potable (entre 25% y 50%) y favorecen circuitos cerrados a nivel de vivienda (Bolivar et al., 2022; Baykal, 2019).

Potencial de reúso y volúmenes recuperables

El agua gris representa entre el 50% y 80% del volumen total de agua residual doméstica (Liu et al., 2021). De este volumen, entre el 60% y 90% puede recuperarse por medio de sistemas domésticos bien diseñados. Sus usos más comunes incluyen:

- Descarga en inodoros (30-35% del uso total de agua en viviendas).
- Riego de jardines y lavado de pisos o vehículos (10-20% del uso).
- Lavado de ropa (en sistemas con segregación de detergentes biodegradables).

Su reúso permite ahorrar agua potable y reducir la presión hidráulica sobre los sistemas de drenaje y tratamiento convencionales, por lo que contribuye además a mitigar riesgos de saturación e inundaciones (McCarton et al., 2022).

Vacíos en el marco normativo nacional

El enfoque de este estudio responde a una necesidad crítica de innovación frente a vacíos regulatorios en el contexto nacional que limitan la implementación de sistemas sostenibles de reúso de agua en el ámbito doméstico. A partir de una revisión de la normativa vigente, se aprecia que normas como la NOM-001-SEMARNAT-2021 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2022) y la NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021) se orientan principalmente a controlar vertidos y asegurar la calidad del agua para consumo humano, sin considerar explícitamente el reúso descentralizado de aguas grises en viviendas. Aunque existen otras normas como la NMX-AA-164-SCFI-2013 (Secretaría de Economía, 2013), que proporciona una guía para el reúso doméstico, su carácter no vinculante impide su adopción amplia. También, la NOM-003-SEMARNAT-1997 (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1998), aún vigente para ciertos usos de agua residual tratada, no separa entre aguas grises y negras, lo que impide la adecuación tecnológica y normativa que requieren las soluciones sostenibles específicas para aguas grises.

Debido a que el marco regulatorio actual no considera de forma directa las condiciones y necesidades del reúso del agua a nivel doméstico, se requiere una metodología que parta desde la escala local, diseñando sistemas eficientes y replicables que puedan adaptarse a contextos urbanos diversos, especialmente en ciudades con presión hídrica como Pachuca.

Metodología

El contexto metodológico de este estudio plantea el diseño de un sistema integrado de tratamiento de aguas grises, con base en criterios de:

- Viabilidad técnica en viviendas urbanas.
- Eficiencia en la remoción de contaminantes.
- Adaptabilidad espacial.
- Capacidad de escalabilidad hacia políticas públicas.

Este enfoque busca proponer un sistema complementario a la infraestructura convencional por medio de tecnologías de bajo impacto que empaticen con la naturaleza y sea congruente con los principios de economía circular y resiliencia hídrica. En ese sentido el estudio consta de cuatro fases:

Fase 1. Análisis del consumo de agua doméstica
Fase 2. Identificación de fuentes de generación de aguas residuales
Fase 3. Evaluación tecnológica
Fase 4. Cálculo de volúmenes tratables y requerimientos técnicos

En la primera fase para poder realizar el análisis se investigó primero el consumo de agua promedio en hogares en Pachuca, para ello, se obtuvieron datos del organismo operador de agua en el que se identifica el volumen por mes de cada vivienda, el monto a pagar de acuerdo a la tarifa y la ubicación aproximada de la vivienda, así mismo, se contrastó la información del agua con la obtenida en el Censo Nacional de Población y Vivienda 2020, para analizar el número de ocupantes, y las características de las viviendas. En la segunda fase, se realizó un diagrama conceptual sobre economía circular identificando el tipo de aguas residuales y sus fuentes, las aguas grises y negras. Después se realizó un segundo diagrama introduciendo el tratamiento doméstico y el reciclaje de aguas grises. Así mismo, en la tercera fase se investigaron tipos de tratamientos y de tecnologías filtrantes para conocer la posibilidad de reciclaje. Por último, se calcularon las cantidades de agua que se pudieran tratar y las necesidades de cambios en las tuberías para conocer una cantidad aproximada de agua reciclada. Cabe señalar que también se analizaron los principales factores que promueven o inhiben la demanda de agua a nivel doméstico.

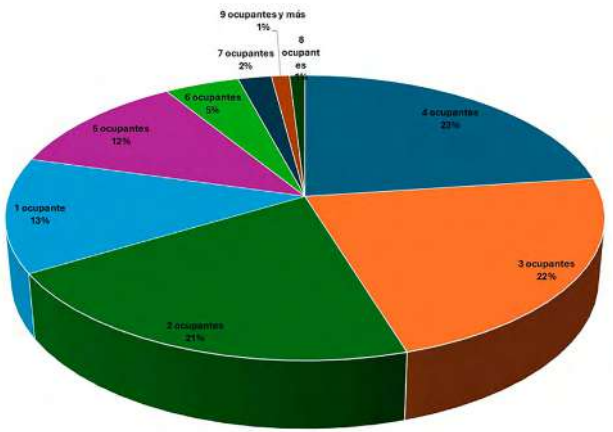
Resultados y análisis

El consumo promedio de agua en una vivienda en la ciudad de Pachuca es de alrededor de 267 litros al día, lo cual representa un uso de aproximadamente 67 litros diarios por persona, pudiendo estos variar dependiendo de factores estacionales como el clima, la temperatura, factores económicos

como nivel de ingreso, infraestructura y tecnología doméstica (regaderas y grifos ahorradores), factores culturales como educación o conciencia ambiental, edad, salud, entre otros. Estas cifras se obtuvieron de acuerdo con información de CAASIM para el año 2008, así como con datos del Censo Nacional de Población y Vivienda 2020 de INEGI.

En la figura 13.1 se observa que el número de ocupantes por vivienda corresponde en primer lugar a 4 personas con 23%, le siguen las viviendas con 3 integrantes u ocupantes 22%, después las viviendas con 2 personas con 21%, estas tres categorías son las que mayor representan el número de integrantes por vivienda (2 a 4 ocupantes). Luego las viviendas con 1 ocupante con 13% y 5 ocupantes con 12%, las cinco categorías anteriores representan el 91.2% del total de viviendas de Pachuca (INEGI, 2022).

Figura 13.1. *Número de ocupantes por vivienda en la ciudad de Pachuca*



Fuente: INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020. Tabulados del Cuestionario Básico.

En la tabla 13.2 se presentan los tipos de tarifas cobrados en los recibos de agua dependiendo del consumo promedio por segmentos. La tarifa I corresponde a uso domiciliario que va de los 0 a 8 metros cúbicos al mes, esto es alrededor de 267 litros por día; cabe señalar que en este segmento se encuentra el 96% de las viviendas de Pachuca. La tarifa II corresponde a consumos que pueden ser domiciliarios o de negocios, principalmente de servicios que van de 9 a 12 metros cúbicos al mes, esto es

de 300 a 400 litros diarios, la tarifa III corresponde a consumos que van de 13 a 25 metros cúbicos al mes, es decir de 433 a 833 litros diarios y, por último, la tarifa IV, que va de los 26 a 50 metros cúbicos al mes, esto es de 866 a 1 667 litros diarios, en esta tarifa se encuentran principalmente negocios que requieren mayores cantidades de agua, cabe agregar que hay aún más tarifas para consumos arriba de los 50 metros cúbicos sin embargo, los usuarios son del sector industrial (CAASIM, 2023).

Tabla 13.2. *Tipo de tarifas de agua para la ciudad de Pachuca*

Tarifa	***I***	***II***	***III***	***IV***
Consumo m^3	0 a 8	9 a 12	13 a 25	26 a 50
Consumo (litros/día)	0 a 267	300 a 400	433 a 833	866 a 1667
Porcentaje de viviendas por tipo de tarifa	96.08	3.22	0.14	0.57

Fuente: elaboración propia con datos de CAASIM (2008).

Hanemann (1998) establece que la estimación del consumo y demanda de agua puede llegar a variar dependiendo de factores como el número de ocupantes por vivienda, además de otras características sociodemográficas del hogar, tales como la edad, nivel de escolaridad, género, condición de salud de las personas que habitan la vivienda; aspectos físicos de la vivienda, como el número de baños, número de habitaciones y la existencia y tamaño del jardín; las condiciones climáticas, particularmente la temperatura y la precipitación; hábitos de consumo de los miembros de la vivienda, incluyendo frecuencia de baño, lavado de ropa y prácticas de ahorro de agua; y por último la *tecnología instalada* tales como cisterna, tinaco, llaves ahorradoras, etc. Para ello, Hanemann propone dos funciones, una función general con tres variables dependientes básicas, que son los montos pagados de acuerdo con los precios o tarifas del agua, el nivel de ingreso promedio por vivienda, y el clima, representado por las precipitaciones, la temperatura y estacionalidades (Ec. 1). La segunda función que propone es una función de demanda desagregada, en la que se incluyen variables como numero de ocupantes, hábitos de consumo e higiene, la tecnología relacionada con el consumo de agua y la disponibilidad de drenaje (Ec. 2).

$$D = f(P, I, z) \tag{1}$$

Donde:
D = Demanda de agua
P = Monto pagado de acuerdo con la tarifa
I = Ingreso promedio de las personas que habitan la vivienda
z = clima local (precipitaciones y temperatura)

$$D = f(P, I, o, h, \rho, d, z) \quad (2)$$

Donde:
D = Demanda de agua
P = Monto pagado de acuerdo con la tarifa
I = Ingreso promedio de las personas que habitan la vivienda
o = número de ocupantes
h = hábitos de consumo, salud, higiene, ahorro de agua
ρ = factor que representa la tecnología de uso y ahorro del agua
d = disponibilidad de drenaje (esta puede contribuir a un menor o mayor consumo de agua)
z = clima del lugar

Disponibilidad promedio de agua y demanda

ONU-Hábitat (2018) comenta que una dotación mínima de 20 litros diarios de agua por persona para consumo en su vivienda podría ser suficiente en casos extremos, sin embargo, recomienda de 50 a 100 litros diarios por persona, dependiendo de la disponibilidad de agua en cada región. Por su parte, la Conagua (2012) en su estudio "Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable en el sector doméstico en México" y en el "Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento" (Conagua, 2019) establecen otros parámetros para el abastecimiento de agua, los cuales se basan en el tipo de clima y en el nivel socioeconómico de las viviendas, para el caso de Pachuca, que se encuentra en un tipo de clima seco la dotación de agua rondaría entre 184 y 202 litros por persona al día desde el nivel de ingresos más bajos al más alto (Conagua, 2019, p. 112).

Los estudios de demanda de agua han registrado que el consumo de agua puede variar significativamente de acuerdo con las características del clima de cada región, o las estaciones del año (primavera-verano u otoño-invierno), la demanda de agua en una vivienda puede aumentar desde 20% hasta 70% conforme las temperaturas aumentan (Magaña, Ábrego y Méndez, 2024). Por su parte, las características de las viviendas y el nivel de ingreso por vivienda también representan un factor determinante para el consumo de agua, de hecho, puede ser que se encuentre estrechamente vinculado, pues entre mayor es el ingreso las viviendas cuentan con mayor número de baños, tina, cisterna, jardín, alberca, numero de lavabos, es decir mayor consumo (Montecillo, 2017).

En este punto las tarifas juegan un papel importante para incidir en el uso racional del agua, así como en una distribución equitativa, además de obtener recursos para el mantenimiento y construcción de infraestructura hídrica (Ferro y Lentini, 2013). El sistema de pago por tarifas contribuye al ahorro del agua al establecer segmentos con cuotas diferenciadas de acuerdo con la cantidad de agua consumida, empezando con una cuota básica en la que la mayoría de la población tiene acceso al agua, y conforme el consumo es mayor las cuotas van aumentando (Howe y Linaweaver, 1967). Si bien el ingreso disponible es mayor a los consumos mayores, se debe calcular la disposición a pagar y la elasticidad precio del agua para que el efecto de ahorro de agua surta efecto, esta disposición a pagar y la elasticidad precio del agua tienen efecto debido a que las personas requieren el agua y cuentan con un presupuesto establecido (dependiendo de cada nivel de ingreso) para tener acceso al agua, sin embargo, al aumentar el precio del agua ya sea por un mayor consumo o simplemente debido a los costos o escasez, las personas estarán dispuestas a pagar hasta un nuevo límite de su presupuesto, o en su defecto reducir su consumo para no pagar por el aumento (Morales-Novelo et al., 2018; Espey et al., 1997).

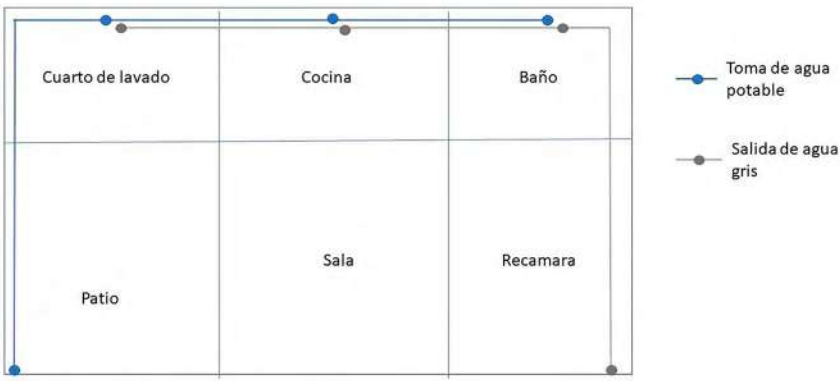
Uso de agua a nivel doméstico

En el caso de México, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Artículo 115, Fracción III, establece que los municipios son los en-

cargados de dotar de agua potable a las viviendas mediante los organismos operadores de agua, así como establecer las cuotas o tarifas de cobro. Bajo el modelo convencional de consumo de agua en las viviendas, el agua es abastecida por una sola fuente, es decir los organismos operadores de agua; en la ciudad de Pachuca el organismo operador es la Comisión de Aguas y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales (CAASIM).

En la figura 13.2 se observa un diagrama que muestra el flujo de agua desde el abastecimiento, su paso por diversos usos, como lavado de ropa, baños, cocina, así como el flujo de aguas residuales tanto grises como negras. Este sistema se puede denominar lineal, ya que pasa por una tubería que distribuye el agua potable para todos los usos en la vivienda, sin importar, que no todos los usos requieren agua potable, y por otro se encuentra la tubería de desagüe para aguas residuales, igualmente solo una tubería mezclando aguas negras con aguas grises sin importar que la mayor proporción del agua se puede reutilizar mediante un sistema de tratamiento doméstico.

Figura 13.2 *Diagrama de flujo de agua lineal*



Fuente: elaboración propia.

La distribución de agua de acuerdo con los distintos usos de agua dentro de la vivienda se tiene, que el mayor consumo se encuentra en el baño a la hora de la ducha con 48%, le sigue el uso de agua para los inodoros con 19.5%, el uso en la cocina para lavar trastes con 17%, después el lavado de ropa con 9.3% y por último el uso para lavarse las manos y otros usos 5.6% (tabla 13.3).

Tabla 13.3. *Consumo promedio de agua de una vivienda*

Usos	*Porcentaje*	*Litros por vivienda*	*Tipo de agua*
Ducha	48.2	129.0	Gris
Lavado de ropa	9.3	24.8	Gris
Cocina, lavado de trastes	17.4	46.5	Gris
Descarga del inodoro	19.5	52.1	Residual
Lavabo del baño y otros usos	5.6	14.9	Gris

Fuente: elaboración propia con base en Conagua (2012).

Cabe señalar que el agua para consumo humano que se destina para beber y cocinar no entra en estas proporciones. La Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 establece los límites permisibles de calidad del agua para consumo humano en México, esta establece los parámetros sanitarios que deben cumplir los organismos responsables de los sistemas de abastecimiento de agua tanto públicos como privados (Conagua, 2012). No obstante, existen problemas en la infraestructura y aún en las mismas viviendas para contar con agua libre de microorganismos, bacterias, entre otros contaminantes. Es decir, los organismos operadores de agua tienen que entregar agua que sea capaz de consumirse o beberse, pero las viviendas tienen la responsabilidad de conservar limpios sus tinacos y contar con filtros para evitar consumir agua contaminada (ANEM, 2024).

Este modelo de consumo de agua lineal en las viviendas ha generado niveles de contaminación y degradación de los acuíferos muy altos, además que se pierden enormes cantidades de agua al mezclar el agua contaminada con el agua limpia de los ríos, además de la contaminación de suelos, generación de infecciones y enfermedades (Lin, Yang y Hu, 2022). Aunado a ello, hay un incremento de las emisiones de CO_2 y metano que producen las aguas residuales tanto por detergentes, así como por las aguas negras; en ese sentido los costos por limpieza y tratamiento de aguas a niveles macro se vuelven incosteables e insostenibles, de ahí que sea necesario cambiar el actual modelo por uno de tipo circular (He et al., 2023).

Agua circular en viviendas

El agua que puede reciclarse o reutilizarse en una vivienda puede llegar a representar entre el 30 y 70% dependiendo de diversos factores, especialmente lo que se refiere a aguas grises, dado que se han encontrado diversos estudios y técnicas que contribuyen al reciclado del agua y su reutilización para segundos usos sin comprometer la salud humana (Jeffrey, 2002; Wanjiru y Xia, 2018; Fane y Reardon, 2013).

Los beneficios de reciclar el agua son múltiples, desde la reducción de la dependencia y del consumo de agua proveniente de los organismos operadores, reducción de los costos de mantenimiento, reducción de la contaminación de mantos acuíferos, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mayor conciencia ambiental, entre otros (Abubakar, 2018).

La tabla 13.4 muestra el impacto positivo del agua circular y las áreas dónde se puede reducir la contaminación por la descarga de aguas residuales sin previo tratamiento. De acuerdo con el INECC (2018), las aguas residuales contribuyen con el 1.6% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), esto es de 0.5 a 2.2 kg de CO_2 eq. por cada metro cúbico de agua residual. En la ciudad de Pachuca, las descargas de aguas residuales van de los 120 a 250 litros por vivienda, mientras que el porcentaje de viviendas con acceso a drenaje y saneamiento es de 97.9%, sin embargo, en cuanto a tratamiento en Hidalgo sólo se alcanzan a tratar el 67.7% de las aguas residuales, lo cual representa un déficit de tratamiento de 32.3%. A ello, se agrega la drástica disminución del gasto público en el mantenimiento y operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales, mientras que en 2012 se destinaron para este rubro 28 350 mdp, para el 2022 se destinaron tan solo 5 726 mdp, cuando la cantidad requerida mínima para su operación se ha calculado en 57 403 mdp (CEFP, 2022).

Otro problema relacionado con la falta de tratamiento de aguas residuales son las enfermedades que ocasionan, en 2015 se registraron en México 3 754 muertes por enfermedades gastrointestinales infecciosas, entre ellas, cólera, amebiasis, hepatitis, salmonelosis. De acuerdo con Blanca Jiménez (UNAM, 2002), solo entre el 10% y 15% de las plantas de tratamien-

Tabla 13.4. *Beneficios del reciclado de agua en viviendas*

Beneficios del reciclado de agua en viviendas
Reducción en el consumo de agua proveniente del sistema de dotación de agua potable
Reducción de costos de operación y mantenimiento en drenajes
Reducción de contaminación de ríos y suelos por aguas residuales
Emisiones de gases de efecto invernadero
Reducción en daño a los ecosistemas
Reducción a la vulnerabilidad de la escasez de agua en ciudades

Fuente: elaboración propia.

to cumplen las normas oficiales de saneamiento, y un alto porcentaje no tiene la capacidad de tratar el agua para ofrecer la calidad debida.

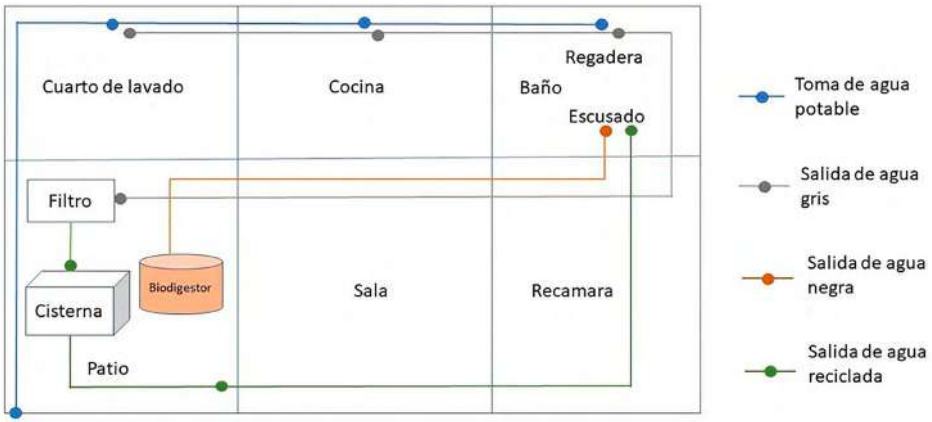
El modelo de agua circular contrasta con el modelo convencional. En la figura 13.3 se observa un diagrama con diversos sistemas de tuberías tanto para la distribución de agua dentro de la vivienda para diversos usos, así como desagüe tanto para aguas grises y aguas negras por separado, mientras en el caso de la dotación se cuenta con el agua proveniente por parte del sistema operador del agua, así como de una segunda fuente que es el agua reciclada, una vez que ha tenido un tratamiento de limpieza y filtrado doméstico.

La línea azul representa la tubería de agua potable proveniente del servicio municipal. La tubería gris representa la salida de aguas grises provenientes del cuarto de lavado, cocina, regadera y lavabos, la cual va a dar a un sistema de filtrado; una tercera tubería dividida de la anterior lleva aguas negras provenientes de los inodoros hacia un biodigestor para eliminar bacterias y malos olores.

Una cuarta y última tubería va desde un repositorio de aguas grises tratadas mediante filtrado hacia los inodoros o para regar el jardín y reutilizarla, así mismo, dependiendo del grado de filtración y limpieza pudiera ser utilizada en usos como lavado de ropa, regadera, lavabos, entre otros.

De acuerdo con Albalawneh, Chang y Akroush (2016), existen diversas formas de filtrado y limpieza del agua, dependiendo principalmente del tipo de filtros y del uso que se le vaya a dar. Dado que las aguas grises tienen un menor contenido orgánico y de DBO, y están libres de materia

Figura 13.3. *Diagrama de agua circular en vivienda*



Fuente: elaboración propia.

fecal que favorezca la reproducción de bacterias, podrían reciclarse fácilmente mediante diversas técnicas (Prashanna y Heenalisha, 2019).

El reciclaje de aguas grises se está llevando a cabo en diversos países, entre ellos, India y Reino Unido (Abbas y Ali, 2023; Benavides, Ramírez y Bracho, 2016; Kristo, 2018), debido a la escasez y a la posibilidad de contar con agua de una manera segura y con costos menores. Además de este tipo de estrategias de tratamiento de agua o reciclaje de agua, se encuentran otras como la captación de agua de lluvia, el uso de jardines verticales para el filtrado de aguas grises, el uso de biodigestores para producción de biogás, entre otros (Mohamed, Shamsudin y Mohd, 2020; Parsons et al., 2010; Aguirre et al., 2024).

En la tabla 13.5 se observa la dotación de agua diaria promedio por vivienda, además de otros indicadores como el volumen de aguas residuales por tipo, ya sean aguas grises o negras, el volumen de tratamiento y, por último, el volumen disponible, y el porcentaje de ahorro por reciclar el agua.

Cabe señalar que algunas de las dificultades para realizar este modelo es la necesidad de reconstruir las tuberías para poder realizar el reciclado, específicamente para casas ya construidas, por el contrario, las casas nuevas se pudieran realizar ajustes a sus instalaciones.

Tabla 13.5. *Cantidad de agua ahorrada por reciclamiento mediante filtración*

Uso del agua	*Cantidades o porcentajes*	*Cantidades o porcentajes*
Dotación de agua por vivienda	267 litros	267 litros
Aguas grises	214.9 litros	214.9 litros
Aguas negras	52.1 litros	52.1 litros
Pérdidas	26.7 (10%)	53.4 (20%)
Agua reciclada gris	193.4	171.9
Ahorro	72.4%	64.4%

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El agua, como recurso natural escaso debe aprovecharse de forma sostenible, es por ello que se buscan nuevos modelos de reciclaje de aguas grises para vivienda para combatir la creciente escasez del vital líquido y reducir la presión sobre el gasto público para tratamiento de aguas residuales, el cual no solo cada vez es menor, sino que se requieren de cantidades exorbitantes para poder limpiar el agua que daña ecosistemas, la salud humana de las personas que viven cerca de los ríos o presas que llevan aguas residuales, además de las emisiones de GEI, entre otros impactos negativos.

El análisis de la viabilidad de reciclaje de aguas grises resulta positivo y factible, especialmente para reutilizar el agua en primer lugar para inodoros, dependiendo el grado de filtración, en segundo otros usos como limpieza de ropa, ducha, etc. Las limitantes o consideraciones para implementar son, por un lado, la redistribución y división de las tuberías, para separar las aguas negras de las aguas grises, mientras que las aguas negras pueden ir hacia un biodigestor, las aguas grises pudieran ir hacia una cisterna, que previamente ha sido limpiada y filtrada.

Referencias

Abbas, E. K. y Ali, S. A. K. (2023). Evaluación de un sistema de percolación biológica con diferentes capas de material para el tratamiento de aguas grises. En *IOP Conference*

Series: Earth and Environmental Science (vol. 1232). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1232/1/012018

Abubakar, I. R. (2018). Estrategias para afrontar el suministro inadecuado de agua doméstica en Abuja, Nigeria. *Water International, 43*(5), 570-590. https://doi.org/10.1080/02508060.2018.1490862

Aguirre, E., Lizárraga, L., Coronel-Olivares, C. (2024). Performance of construction and demolition waste coupled with selected vascular plants for greywater treatment in natural solutions. *Waste Biomass Valor, 15,* 5463-5473. https://doi.org/10.1007/s12649-024-02510-7

Al Jahmani, A. K., Rao, L. N., Varghese, M. J. y Al-Shehhi, M. (2022). Recycling of greywater using sustainable domestic technologies: Performance and limitations. *Journal of Environmental Management, 305,* 114354.

Albalawneh, A., Chang, T. K. y Akroush, S. (2016). Reusing treated greywater for irrigating home gardens: Understanding user experiences. *Taiwan Water Conservancy, 64*(1), 105-115.

Asociación Nacional de Entidades de Aguas y Saneamiento de México (ANEAS). (2024). Lineamientos de cumplimiento para la NOM-127-SSA1-2021. https://aneas.com.mx/wp-content/pdf/documentos-oficiales/11-lineamientos%20NOM-127-SSA1-2021.pdf

Baykal, B. B. (2019). Recycling/reusing grey water in households: A key strategy in circular water economy. *Journal of Environmental Management, 238,* 1-7.

Benavides, A., Ramírez-Guerrero, T. y Bracho, G. (2016). Desarrollo de un prototipo de un sistema automático de recolección y reciclaje de aguas grises. *Agunkuya, 6,* 40-48. https://doi.org/10.33132/issn.2027-9574

Bigurra-Alzati, C. A., Ortiz-Gómez, R., Vázquez-Rodríguez, G. A., López-León, L. D. y Lizárraga-Mendiola, L. (2021). Water conservation and green infrastructure adaptations to reduce water scarcity for residential areas with semi-arid climate: Mineral de la Reforma, Mexico. *Water, 13*(1), 45. https://doi.org/10.3390/w13010045

Bolivar, V., Poganietz, W.-R. y Fröhling, M. (2022). Integration of greywater reuse in the circular economy: A multi-criteria evaluation. *Water Research, 213,* 118148. https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118148

Calisto, M., Vermeulen, W. y Salomone, R. (2020). A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm. *Resources, Conservation and Recycling, 161,* 104917. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104917

Calisto, M., Vermeulen, W. y Salomone, R. (2021). Analyzing European Union circular economy policies: Words versus actions. *Sustainable Production and Consumption, 27,* 337-353. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.001

Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP). (2022). *Evolución del gasto en materia hídrica 2012-2022* [Nota informativa]. Cámara de Diputados. https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/nota/2022/notacefp0422022.pdf

Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2012). *Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable en el sector doméstico en México.* CIDE / Semarnat.

Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado*

y saneamiento: Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. Semarnat. https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/sgapds-1-15-libro4.pdf

Drangert, J. O. y Kjerstadius, H. (2023). Reciclaje: El futuro sumidero urbano de aguas residuales y residuos orgánicos. *City and Environment Interactions, 19,* 100104. https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100104

Engelenhoven, T., Kassahun, A. y Tekinerdogan, B. (2021). Circular business processes in the state-of-the-practice: A survey study. *Sustainability, 13*(23). https://doi.org/10.3390/su132313307

Espey, M., Espey, J. y Shaw W. D. (1997). Price elasticity of residential demand for water: A metaanalysis. *Water Resources Research, 33*(6), 1369-1374. https://doi.org/10.1029/97wr00571

Ferro, G. y Lentini, E. (2013). *Políticas tarifarias para el logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM): Situación actual y tendencias regionales recientes* (Documento de proyecto). CEPAL / Ministerio de Asuntos Exteriores de Francia.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. y Hultink, E. (2017). The circular economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production, 143,* 757-768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Gifreu Font, J. (2018). Ciudades adaptativas y resilientes ante el cambio climático: Estrategias locales para contribuir a la sostenibilidad urbana. *Revista Aragonesa de Administración Pública,* (52), 102-158. https://doi.org/10.71296/raap.129

Gobierno del Estado de Hidalgo (GOH). (2023). *Plan estatal de desarrollo 2022-2028.* https://bibliotecadigitaluplaph.hidalgo.gob.mx/Biblioteca%20Digital%20de%20Planeación/Estatal/Plan%20Estatal%20de%20Desarrollo%202022-2028.pdf

Gómez-Azpeitia, G., Tejeda-Martínez, A., Herrera-Sosa, L. C. (2023). *Arquitectura, confort y cambio climático* (pp. 216-222). Puerta Abierta. https://www.uv.mx/peccuv/files/2023/10/Arquitectura-Confort-y-Cambio-Climatico.pdf

Hanemann, M. (1998). Price and rate structure. En *Advances in the economics of environmental resources, vol. 1: Marginal cost rate design and wholesale water markets.* Jai.

Harris, S., Martin, M. y Diener, D. (2021). Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. *Sustainable Production and Consumption, 26,* 172-186. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.018

He, Y., Li, Y., Li, X., Liu, Y., Wang, Y., Guo, H., … y Liu, Y. (2023). Net-zero greenhouse gas emission from wastewater treatment: Mechanisms, opportunities and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 184,* 113547. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113547

Heshmati, A. (2017). A review of the circular economy and its implementation. *International Journal of Green Economics, 11*(3-4), 251-288. https://doi.org/10.1504/ijge.2017.089856

Howe, C. W. y Linaweaver, F. P. (1967). The impact of price on residential water demand and its relationship to system design and price structure. *Water Resources Research, 3*(1),13-32. https://doi.org/10.1029/wr003i001p00013

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero 1990-2015.* Semarnat.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2020.* https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). *Cuéntame de México: Sección educativa, Geografía, usos del agua.* https://cuentame.inegi.org.mx/explora/geografia/usos_del_agua/

Jeffrey, P. (2002). Actitudes públicas respecto al reciclaje de agua en el hogar en Inglaterra y Gales. *Water and Environment, 16*(3), 214-217. https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2002.tb00397.x

Kirchherr, J., Reike, D. y Hekkert, M. (2017). Conceptualización de la economía circular: Un análisis de 114 definiciones. *Resources, Conservation and Recycling, 127,* 221-232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

Kristo, K. (2018). Reutilización innovadora del agua mediante un esquema de redistribución: Beneficios y desafíos. *Revista Europea de Estudios Interdisciplinarios, 4*(3), 54-60. https://doi.org/10.26417/ejis.v4i3.p54-60

Lakho, F. H., Le, H. Q., Mattheeuws, F., Igodt, M. et al. (2023). Decentralized water systems and circular economy in the global south: A policy perspective. *Sustainable Cities and Society, 92,* 104457. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104457

Liao, X., Chai, L. y Liang, Y. (2021). Income-based adoption of household greywater reuse systems: A comparative analysis. *Journal of Cleaner Production, 279,* 123456. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123456

Lin, L. yang, H. y Xu, X. (30 de junio de 2022). Efectos de la contaminación del agua en la salud humana y la heterogeneidad de las enfermedades: Una revisión. *Frontiers in Environmental Science, 10.* https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246

Liu, G. y Zhang, F. (2022). Inequality of household water footprint consumption in China. *Journal of Hydrology, 612.* https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128241

Liu, S., Butler, D., Memon, F., Makropoulos, C., Avery, L. y Jefferson, B. (2021). Global water scarcity and urban water reuse potential. *Resources, Conservation & Recycling, 173,* 105748.

Magaña, V., Ábrego, C. y Méndez, B. (2024). El clima cambiante y los consumos domésticos de agua en ciudades de México. *Investigaciones Geográficas,* (114), e60850. https://doi.org/10.14350/rig.60850

McCarton, L., O'Hogain, S. y Nasr, A. (2022). Greywater reuse for sustainable urban water management: Lessons from Europe. *Environmental Technology & Innovation, 25,* 102208.

Mohamed Zaki, M. B. A., Shamsudin, R. y Mohd Yusoff, M. Z. (2020). Portable biodigester system for household use: A review. *Advances in Agricultural and Food Research Journal, 2*(2). https://doi.org/10.36877/aafrj.a0000148

Montecillo Cedillo, J. L. (2017). Suministro de agua potable en México: Más allá del crecimiento poblacional. *Tecnología y Ciencias del Agua, 8*(1), 21-33. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-02

Morales-Novelo, J. A., Medina, C. M., Tapia, L. y Fernández, D. (2022). Household water

consumption on the outskirts of Mexico City. *International Journal of Hydrology, 6*(3), 110-117. https://doi.org/10.15406/ijh.2022.06.00310

Morales-Novelo, J. A., Rodríguez, L. y Revollo, D. A. (2018). Inequality in access to drinking water and subsidies between low- and high-income households in Mexico City. *Water, 10*(8). https://doi.org/10.3390/w10081023

Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling, 153,* 104553. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553

Negrei, C. y Istudor, N. (2018). Circular economy: Between theory and practice. *Amfiteatru Economic, 20*(48). https://doi.org/10.24818/ea/2018/48/498

Neunteufel, R., Richard, L. y Perfler, R. (2014). Water demand: The Austrian end-use study and conclusions for the future. *Water Science and Technology: Water Supply, 14*(2), 205-211. https://doi.org/10.2166/ws.2013.190

ONU-Hábitat. (2018). *The global water operators' partnerships alliance (GWOPA) strategy 2013-2017*. https://unhabitat.org/evaluation-of-the-global-water-operators-partnerships-alliance-gwopa-strategy-2013-2017-1-2018

Parsons, D., Goodhew, S., Fewkes, A. y de Wilde, P. (2010). The perceived barriers to the inclusion of rainwater harvesting systems by UK house building companies. *Urban Water Journal, 7*(4), 257-265. https://doi.org/10.1080/1573062x.2010.500331

Petit-Boix, A. y Leipold, S. (2018). Circular economy in cities: Reviewing how environmental research aligns with local practices. *Journal of Cleaner Production, 195,* 1270-1281. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.281

Plastinina, I., Teslyuk, L., Dukmasova, N. y Pikalova, E. (2019). Implementation of circular economy principles in regional solid municipal waste management: The case of Sverdlovskaya Oblast (Russian Federation). *Resources, 8*(2). https://doi.org/10.3390/resources8020090

Poleo, D. (2016). ¿Cambio climático o variabilidad climática? Historia, ciencia y política en el clima mesoamericano. *Revista de Ciencias Ambientales, 50*(1), 24-39. https://doi.org/10.15359/rca.50-1.2

Prashanna Rangan, R. y Heenalisha, K. (2019). Grey-water treatment and reuse: A review. *Asian Journal of Science and Applied Technology, 8*(1), 5-9. https://doi.org/10.51983/ajsat-2019.8.1.1042

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C. y Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production, 179,* 605-615. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224

Secretaría de Economía. (2013). NMX-AA-164-SCFI-2013: Edificación sustentable: Criterios y requerimientos ambientales mínimos. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5316489&fecha=15/10/2013

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2022). NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap). (1998). Norma

Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998

Secretaría de Salud. (2021). NOM-127-SSA1-2021: Agua para uso y consumo humano: Límites permisibles de la calidad del agua. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=22/03/2022

Torkashvand, J., Sheini, S., Azizi, S. N. y Arfaeinia, H. (2023). Performance evaluation of green wall systems in decentralized greywater treatment. *Ecological Engineering, 185,* 106891.

Usha, D. y Anslin, J. (2019). Tratamiento de aguas grises para ciudades inteligentes mediante el Internet de las Cosas (IoT). *Revista Internacional de Tecnología e Ingeniería Reciente, 8*(no. esp. 5), 114-116. https://doi.org/10.35940/ijrte.B1025.0782S519

Velenturf, A. P. M. y Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption, 27,* 1437-1457. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018

Wanjiru, E. y Xia, X. (2018). Sustainable energy and water management for residential homes with integrated optimal recycling of grey and rainwater. *Journal of Cleaner Production, 170,* 1151-1166. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.212

Yong, R. (2007). The circular economy in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 9*(2), 121-129. https://doi.org/10.1007/s10163-007-0183-z

Zúñiga, V., Leiva, S., Riquelme, C., Gómez, G., Vidal, G. y Neumann, P. (2023). Assessing the environmental impacts of household water supply: A case study considering consumption patterns within a life-cycle perspective. *Sustainability, 15*(3). https://doi.org/10.3390/su15031946

14. Gestión del uso del agua en los hogares mexicanos: Una oportunidad para la economía circular

Berenice Mendoza-Carbajal[1]
Hilda Guerrero García-Rojas[2]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.14

Resumen

Las cuencas del centro de México son las que tienen mayor densidad poblacional, por lo que nos interesa conocer la forma en que se gestiona el uso del agua en sus zonas rurales y urbanas; y por género. Este artículo analiza la distribución, dotación y drenaje de agua en los hogares de las cuencas hidrológico administrativas de la zona central de México, con datos de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) 2022, así como información de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Se utilizan las técnicas de minería de datos y análisis estadístico. Se destaca la importancia de garantizar el uso equitativo y sostenible del agua en zonas rurales, principalmente, mejorando la infraestructura para el uso del agua y proponiendo medidas para mejorar su gestión en beneficio de los hogares y la sostenibilidad del recurso hídrico. En una segunda etapa, haciendo uso de los principios de la economía circular, se revisa la oportunidad que puede ofrecer este enfoque como una herramienta para la mejor gestión del agua en los hogares mexicanos.

Palabras clave: *economía circular del agua, cuencas hidrológico-administrativas, perspectiva de género.*

[1] Doctora en Administración por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2526-9914
[2] Doctora en Recursos Ambientales. Profesora en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4226-8027

Introducción

El agua es un recurso vital para la vida humana, fundamental en actividades esenciales para la salud y el desarrollo del capital humano (Damania, 2018). Suministrar agua representa un reto ante el crecimiento poblacional y la inadecuada administración del recurso (Conafovi, 2005; FEA et al., 2006), en particular la Organización de las Naciones Unidas reconoce el agua como una prioridad, integrándola en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, que busca asegurar su disponibilidad y saneamiento para todos (Comisión Nacional de los Derechos Humanos, 2014; Guppy y Anderson, 2017; López et al., 2017; Naciones Unidas Derechos Humanos et al., 2010; ONU, 2011; Tello Moreno, 2008). En México, el recurso hídrico presenta problemas de sobreexplotación de acuíferos y deficiencias en la gestión del agua que dificultan su acceso, especialmente en comunidades rurales y en zonas marginadas cuyo impacto no sólo repercute en lo económico, sino también en lo ambiental y la salud de los mexicanos, al mismo tiempo la tala inmoderada ha ocasionado cambio de uso de suelo en diversas partes del país (Conagua, 2022; García Barrios y Mozka Estrada, 2022; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua, 2021; Semarnat y Conagua, 2015).

La economía circular del agua (CEW por sus siglas en inglés: *circular economy of water)* se enfoca en la reutilización del recurso, regeneración y reducción del consumo, con el fin de evitar extraer, usar y eliminar. Utilizar la herramienta de la economía circular para el agua conlleva 4 pasos: repensar, disminuir, optimizar y retener el vital líquido (Collaborative Project, 2019; Morseletto et al., 2022), además mejora la gestión y tratamiento del recurso, disminuyendo la demanda para el consumo humano, industria y agricultura (Hlavínek et al., 2023; Lima et al., 2025). La gobernanza del agua está ligada a la economía circular del agua, porque se encarga de revisar aspectos administrativos y sociales (la gestión del suministro del agua está a cargo de los gobiernos), pero también atañe al ámbito político y en general a los individuos involucrados (Jakeman et al., 2016). El reto se presenta al tener que gestionar el vital líquido de manera sostenible, equitativa y eficiente en todo el país.

Nuestra hipótesis sugiere que la reutilización, regeneración y reducción del consumo del agua (principios de economía circular) podría mejorar el acceso y la sostenibilidad del recurso hídrico, generando mayor equidad, particularmente (pero no exclusivamente) en zonas rurales. El propósito de esta investigación es analizar cuál es la infraestructura con la que llega el agua a los hogares ubicados en las diversas cuencas hidrológicas del centro de México, además de la dotación (frecuencia), los tipos de almacenamiento y los sistemas de drenaje en viviendas rurales y urbanas. Se exploran los contrastes entre las condiciones de acceso al agua en estas zonas y el rol de cada género, para identificar las necesidades y limitaciones específicas de cada contexto. Con esta investigación se reflexiona sobre la oportunidad que presenta la economía circular del agua dentro de lo hogares como una estrategia que busca optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico, reducir desperdicios y fomentar su reutilización

Para ello, se utilizará una metodología de minería de datos y análisis estadístico con información de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) 2022 y datos de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) sobre la configuración de las cuencas hidrológicas. Estos datos permitieron realizar un análisis detallado de las condiciones de acceso, almacenamiento y drenaje del agua en diferentes hogares del país, con énfasis en las características particulares de las zonas rurales y urbanas del centro de México y el impacto diferencial por género, permitiendo identificar dónde se requiere focalizar esfuerzos y reflexionando diversas posibilidades de economía circular del agua dentro de los hogares.

Marco conceptual

La economía circular del agua permite gestionar mejor los recursos, es la encargada de revisar la eficiencia, conservación, tratamiento y reutilización del recurso hídrico, algunos ejemplos de esta herramienta es el tratamiento y reutilización de aguas residuales, la captación de agua de lluvia y el reciclaje de los residuos generados en el proceso (Hlavínek et al., 2023), además puede servir para la creación de plantas hidroeléctricas que, al aprovechar

el ciclo natural del agua con su flujo continuo, no lo degrada, ni lo consume, sino lo reutiliza como recurso renovable (Rasul et al., 2021).

La economía circular del agua se encuentra en sus primeros inicios en el mundo, pero existen ya países que han comenzado a implementar esta herramienta, por ejemplo, en la India, China y países de Europa reutilizan aguas tratadas y diversifican el suministro que fortalece la resiliencia hídrica y mejora la seguridad del agua (Centre for Economic Development Transport and the Environment y SWECO, 2020; World Bank, 2021).

Otro modelo restaura la calidad de los recursos hídricos subterráneos afectados por la contaminación, permite realizar una mejor toma de decisiones al integrar evidencias sobre el impacto social, económico y ambiental, así las estrategias se adaptan a cada territorio, que generan procesos sociales participativos y regeneran los ecosistemas de manera integral (Neverre et al., 2022).

La economía circular, al promover utilizar menores cantidades de agua y la sostenibilidad del recurso, también involucra satisfacer las necesidades sociales del momento, así puede coadyuvar a la equidad hídrica y de género, al facilitar el acceso justo al agua en los hogares y reducir las cargas desproporcionadas que suelen recaer sobre las mujeres en su gestión. Por ejemplo, agricultoras australianas que, para reducir el nivel de pobreza, utilizaron tecnologías agrícolas para un mejor acceso al agua, mayor productividad y posibilidad de autonomía, permitiendo generar participación social y un mejor manejo del recurso hídrico (Lountain et al., 2024). Otros estudios han analizado otras aplicaciones e impactos socioeconómicos al introducir a jóvenes en el ámbito del riego a pequeña escala con estructura de economía circular, permitiendo generación de empleos y participación en la economía local (Parry, 2024).

La economía circular del agua, al estar en sus inicios, presenta diversos retos, como la definición de "eficiencia del agua", ya que, según una revisión sistemática de literatura, esta dependerá de cada contexto, de lo que se opine como balance hídrico y de lo que consideran como beneficio, así se requiere de una comprensión más precisa de estos conceptos y una evaluación de los modelos (Van der Kooij et al., 2013). Otro ejemplo de lo anteriormente mencionado es un estudio que habla sobre la participación de las mujeres en programas de desarrollo ambiental, ya que al insertarlas

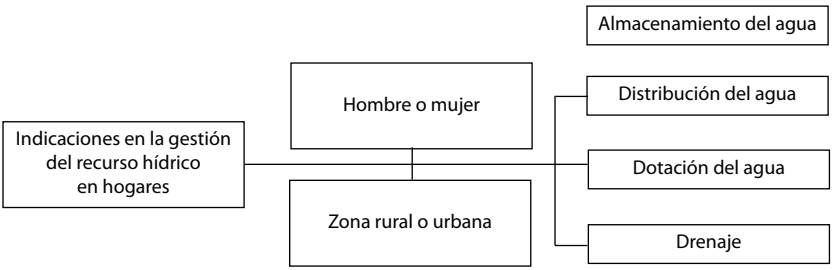
en trabajos que coadyuven a la sostenibilidad socioambiental, no garantiza por sí solo su empoderamiento ni el éxito de las iniciativas, dichos programas pueden reforzar su carga laboral, profundizar su subordinación frente a figuras masculinas y perpetuar las desigualdades de género que buscaban erradicar (Resurreccion, 2006).

Por lo anterior, gobiernos, instituciones y actores deben reflexionar críticamente sobre las experiencias de países (como India y México), donde la Revolución Verde ha tenido un impacto negativo al evidenciar desigualdades económicas y políticas, así como la imposición de intereses externos, provocando inseguridad alimentaria y empobrecimiento —tal es el caso de África subsahariana, al priorizar la producción intensiva para exportación sobre las necesidades locales (Bjornlund y Bjornlund, 2024).

Sin embargo, en todo el mundo, personas, agricultores, industrias y ecosistemas compiten cada vez más por satisfacer sus necesidades diarias de agua; sin una gestión adecuada, los costos de esta competencia no solo son económicos, sino que también implican la pérdida de oportunidades, riesgos para la salud y daños ambientales, lo que resalta la urgencia de transitar hacia una economía circular del agua que promueva su uso eficiente, equitativo y regenerativo (OECD, 2012). Por ello, transitar la economía circular del agua de un enfoque lineal hacia un modelo adaptado a cada territorio y contexto, permite una mejor gestión del agua, afrontar los desafíos de la escasez y la mala calidad del agua y la creación de sistemas más eficientes y resilientes, capaces de responder a las demandas actuales y futuras, maximizando el valor del agua en sectores urbanos, agrícolas e industriales, y reduciendo su impacto ambiental (Lima et al., 2025).

Este trabajo propone revisar la oportunidad que puede otorgar la economía circular con la gestión del agua en los hogares, destacando la importancia de considerar la perspectiva de género y las diferencias entre zonas rurales y urbanas, para entender cómo factores como la distribución, almacenamiento, dotación y el contexto geográfico interactúan y afectan la sostenibilidad en el uso y manejo del agua, promoviendo prácticas más equitativas y eficientes en la gestión de este recurso vital.

Figura 14.1. *Esquema de indicadores que intervienen en la economía circular para la gestión del recurso hídrico en hogares de las cuencas del centro de México*



Fuente: Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2022.

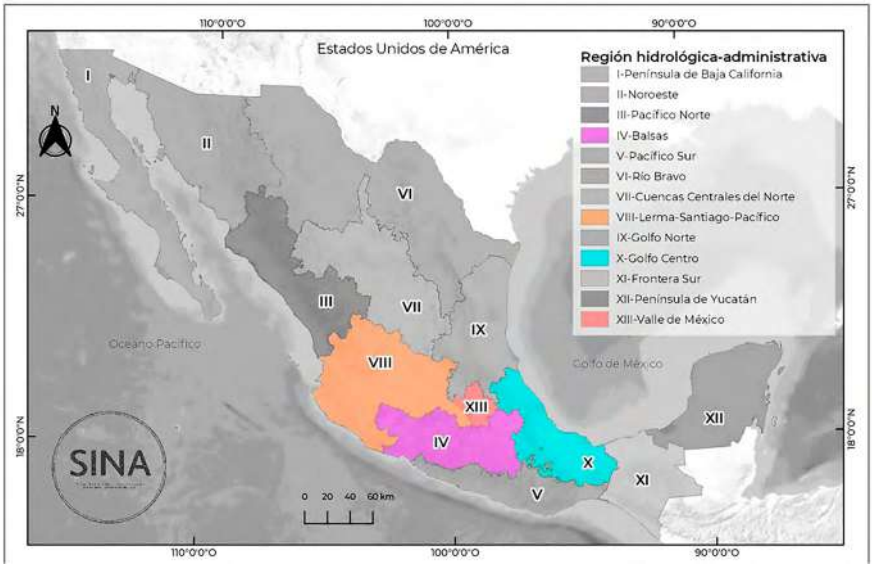
Métodos

Este estudio se basa en datos de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) 2022, proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Para este análisis, nos enfocamos en el periodo de 2022 y en hogares según los indicadores de dotación de agua, distribución, cisterna, tinaco y drenaje, diferenciando por región hidrológico administrativa (centrándonos en las del centro de México), zona rural o urbana y género.

Las cuatro cuencas en las regiones hidrológico-administrativas del centro *(vid.* figura 14.2) incluyen: IV Balsas (municipios de Guerrero, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla y Tlaxcala); VIII Lerma-Santiago-Pacífico (municipios de Estado de México, Guanajuato, Michoacán, Aguascalientes, Jalisco, Zacatecas, Colima y Nayarit); X Golfo Centro (municipios de Puebla, Hidalgo, Veracruz y Oaxaca), y XIII Aguas del Valle de México (municipios de Hidalgo, Estado de México, Ciudad de México y Tlaxcala).

En la siguiente sección observaremos los resultados que hemos obtenido de estas dos técnicas antes mencionadas.

Figura 14.2. *Ubicación geográfica de las cuencas hidrológico administrativas del centro de México*



Fuente: elaboración propia a partir de datos de la Conagua (2024).

Resultados y discusión

Los resultados, a continuación se derivan del análisis de la distribución, almacenamiento, dotación y drenaje del agua en los hogares de las cuencas hidrológico-administrativas del centro de México, indicadores que ayudan a nuestra reflexión sobre las oportunidades que la economía circular del agua ofrece dentro de los hogares.

Disposición, almacenamiento y frecuencia del agua en las cuencas del centro de México

La disposición de agua es la infraestructura con la que llega al hogar, desde entubada dentro de la vivienda hasta personas que realizan recolección de alguna fuente hídrica como pozo, río, entre otras. En ese sentido la disposición del agua podemos observarla en la tabla 14.1, en la que nos interesa revisar si el agua es entubada dentro de la vivienda, cuántas viviendas tienen

captación de agua de lluvia, y si recolectan agua de un pozo, río, lago, arroyo u otra.

Entre las cuencas con mejor infraestructura de agua entubada dentro de la vivienda se encuentran la cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico y XIII Aguas del Valle de México. La cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico tiene un alto porcentaje de viviendas a las que les llega el agua diariamente, sobre todo para hombres y mujeres en el sector urbano (casi del 80%), contra un 56% en zonas rurales, tanto para hombres como para mujeres. La dotación diaria en la cuenca XIII Aguas del Valle de México en mujeres de zona rural y de zona urbana, se representan con un 70% y 60% para los hombres.

Analizamos el porcentaje de hogares que cuentan con captadores de agua de lluvia (ver tabla 14.1), ya que estos representan una estrategia para la economía circular del agua, al reutilizar el recurso disponible. En ese sentido se observa un bajo porcentaje de viviendas que cuentan con captación de agua pluvial, este indicador observa la necesidad de inversión pública o privada para este fin. De las cuatro cuencas analizadas, VIII Lerma-Santiago-Pacífico y XIII Aguas del Valle de México presentan el menor porcentaje de este tipo de infraestructura.

En la tabla 14.1 se localizan los porcentajes de viviendas que al no contar con infraestructura para el uso del agua, tienen la necesidad de recolectar agua de un pozo, río, lago, arroyo u otra fuente hídrica, aunque esta práctica podría parecer un apoyo hacia la economía circular, porque disminuyen la presión sobre la distribución en la red de agua, permiten procesos aparentemente más limpios por no pasar por químicos, entre otros; pero resaltan la gran cantidad de personas que tienen que realizar acarreo y de las viviendas que requieren de lugares de almacenamiento para el uso cotidiano. Las cuencas IV Balsas y X Golfo Centro necesitan mayor atención en infraestructura, por su alto porcentaje de viviendas que requieren recolección de agua. En cuanto al género, ambos hombres y mujeres realizan recolección en mayor o menor medida dependiendo de la zona y la cuenca.

Cuando las viviendas no cuentan con el recurso hídrico de manera diaria, ni con la infraestructura adecuada para el uso dentro del hogar, se requiere un lugar de almacenamiento del agua. Analizamos si las vivien-

Tabla 14.1. *Distribución del recurso hídrico en las cuencas centrales de México, por zona y género*

Cuenca	*Zona/Género*	*Agua entubada dentro de la vivienda*	*Captadores de agua de lluvia*	*Agua de un pozo, río, lago, arroyo u otra*
IV Balsas	Rural Hombre	37%	1.6%	17%
	Urbano Hombre	74%	0.1%	3%
	Rural Mujer	33%	1.9%	16%
	Urbano Mujer	78%	0.0%	2%
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	Rural Hombre	70%	0.1%	3%
	Urbano Hombre	93%	0.0%	1%
	Rural Mujer	67%	0.2%	3%
	Urbano Mujer	92%	0.0%	1%
X Golfo Centro	Rural Hombre	33%	2.2%	16%
	Urbano Hombre	69%	0.0%	8%
	Rural Mujer	35%	1.6%	14%
	Urbano Mujer	68%	0.3%	8%
XIII Aguas del Valle de México	Rural Hombre	70%	0.3%	3%
	Urbano Hombre	87%	0.1%	0%
	Rural Mujer	77%	0.0%	3%
	Urbano Mujer	88%	0.1%	0%

Fuente: Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2022.

das cuentan con tinaco y/o cisterna para el almacenamiento, permitiendo tal vez captación de agua de lluvia, regular el uso y evitar desperdicios de agua. Este tipo de almacenamiento también permite reutilización de aguas grises y permiten autonomía hídrica.

En las cuatro cuencas pocas viviendas cuentan con tinaco *(vid.* tabla 14.2), exceptuando la cuenca XIII Aguas del Valle de México, lo cual genera una brecha para prácticas de circularidad del agua. Requiere principal atención la cuenca IV Balsas. Así mismo, en las cuatro cuencas, un alto porcentaje de viviendas no cuenta con cisterna de almacenamiento, en cuanto al género los más afectados en este sentido son los hombres de las zonas urbanas de las cuencas X Golfo Centro y XIII Aguas del Valle de México.

Tabla 14.2. *Almacenamiento de agua en hogares de las cuencas del centro de México*

Cuenca	*Zona/Género*	*Tinaco*		*Cisterna*	
		Sí	*No*	*Sí*	*No*
IV Balsas	Rural Hombre	26%	74%	9%	91%
	Urbano Hombre	26%	74%	6%	94%
	Rural Mujer	57%	44%	11%	89%
	Urbano Mujer	44%	57%	3%	97%
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	Rural Hombre	52%	48%	13%	88%
	Urbano Hombre	68%	32%	11%	89%
	Rural Mujer	34%	66%	8%	92%
	Urbano Mujer	56%	44%	12%	88%
X Golfo Centro	Rural Hombre	20%	81%	1%	99%
	Urbano Hombre	23%	77%	2%	98%
	Rural Mujer	45%	55%	9%	91%
	Urbano Mujer	49%	51%	3%	97%
XIII Aguas del Valle de México	Rural Hombre	85%	15%	27%	73%
	Urbano Hombre	38%	62%	0%	100%
	Rural Mujer	72%	29%	40%	60%
	Urbano Mujer	100%	0%	0%	100%

Fuente: elaboración propia con base en Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2022.

Relacionado con la dotación de agua dentro de los hogares, es decir la frecuencia con la que llega el recurso, ninguna cuenca cuenta con el 100% de manera diaria, las más afectadas teniendo en promedio un 30% de viviendas que les llega de manera diaria es la IV Balsas y con un 55% X Golfo Centro. Estas dos cuencas son las que presentan mayores problemas al tener en promedio 7% y 4% respectivamente, de viviendas con frecuencia de agua de vez en cuando en sus hogares.

Drenaje en las cuencas del centro de México

Toda vez que hemos analizado la forma en la que llega el agua y su frecuencia, nos interesa conocer de qué manera tiene salida el drenaje de los hogares *(vid.* tabla 14.3). Un drenaje adecuado dentro del hogar permite reutilizar el agua, además de recolectar, redirigir y tratar las aguas residuales o grises.

La salida de aguas grises y su adecuado tratamiento es una condición básica para el ciclo de la economía circular del agua dentro del hogar.

La cuenca IV Balsas es la que presenta mayor déficit de conexión del drenaje a la red pública, siendo los jefes y jefas de familia de zonas rurales los más afectados, aunque habría que considerar el porcentaje de hombres de la zona rural de la cuenca X Golfo Centro los que en porcentaje menor tienen este servicio. Podríamos decir que el hecho de que la vivienda tenga conexión a la red pública permite un tratamiento formal y regulado del agua, con la suposición de que se cuente con plantas tratadoras de agua.

Representa un reto para el país, la gran cantidad de viviendas que no cuentan con el servicio de conexión pública de drenaje y a la vez uno también para la economía circular del agua dentro del hogar. Las fosas sépticas son sistemas descentralizados que, bien gestionados, pueden permitir tratamiento y reúso local del agua. Las zonas rurales de las cuatro cuencas tienen mayores porcentajes de fosas sépticas, la cuenca X Golfo Centro es la que mayor representación tiene.

Una tubería que va a dar a una barranca o grieta, así como la que va a dar a un río, lago o mar conllevan una temática a la que prestar atención, no sólo por los riesgos de salud que conlleva, sino también por el impacto ambiental directo. Este tipo de viviendas urgen de tecnologías que permitan el tratamiento y reutilización de las aguas como parte de una economía circular que evite el deterioro ambiental. Aunque en la tabla 14.3 el porcentaje de este tipo de hogares sea mínimo, consideremos que representan miles de viviendas de esas zonas y cuencas.

Ahora bien, para todas aquellas viviendas que no tiene drenaje, que son principalmente las que se localizan en zonas rurales, potencialmente la economía circular del agua puede coadyuvar a mejorar su condición de salida de aguas grises, con biofiltros, letrinas y otro tipo de tratamientos.

Economía circular como herramienta para la mejor gestión del agua en los hogares mexicanos

La gestión del agua en los hogares en las cuencas del centro de México, requieren implementar un enfoque de economía circular, para optimizar y

Tabla 14.3. *Drenaje en los hogares de las cuencas del centro de México*

Cuenca	*Zona/Género*	*1. La red pública*	*2. Una fosa séptica*	*3. Una tubería que va a dar a una barranca o grieta*	*4. Una tubería que va a dar a un río, lago o mar*	*5. No tiene drenaje*
IV Balsas	Rural Hombre	38%	45%	4%	1%	12%
	Urbano Hombre	89%	8%	1%	1%	1%
	Rural Mujer	39%	43%	4%	1%	13%
	Urbano Mujer	89%	7%	2%	1%	1%
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	Rural Hombre	62%	30%	2%	2%	4%
	Urbano Hombre	97%	2%	0%	0%	1%
	Rural Mujer	61%	29%	3%	1%	5%
	Urbano Mujer	97%	2%	1%	0%	0%
X Golfo Centro	Rural Hombre	29%	53%	4%	0%	14%
	Urbano Hombre	84%	12%	1%	1%	2%
	Rural Mujer	35%	48%	3%	0%	15%
	Urbano Mujer	85%	12%	1%	1%	2%
XIII Aguas del Valle de México	Rural Hombre	67%	26%	2%	1%	5%
	Urbano Hombre	95%	4%	0%	0%	1%
	Rural Mujer	77%	18%	2%	0%	3%
	Urbano Mujer	96%	4%	0%	0%	0%

Fuente: Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2022.

reducir el recurso hídrico. Implementar estrategias como la captación de agua de lluvia (mejorando la infraestructura de captación y almacenamiento), optimizando las salidas de drenaje con tratamiento y reutilización de aguas grises, los hogares pueden minimizar su impacto ambiental y mejorar el acceso al agua. Este apartado revisa la oportunidad de principios de economía circular como una gestión más equitativa y sustentable del agua en los hogares mexicanos, particularmente en zonas con escasez del recurso.

En relación a lo anterior, analizamos los hogares que se encuentran en zonas donde la precipitación pluvial es mayor o igual a 1 500 mm *(vid.* tabla 14.4), además si la vivienda es objetivo del Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales (PROCAPTAR) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Estos hogares tienen que ser de zonas de alta marginación y que pertenecen a la Cruzada Nacional Contra el Hambre, mismos que podrían acceder a un sistema de captación de agua de lluvia gratuito.

Tabla 14.4. *Viviendas de zonas marginadas susceptibles de implementar sistemas de captación de agua de lluvia en las cuencas del centro de México*

Cuenca	*Género/Zona*	*Número de viviendas con precipitación pluvial mayor o igual a 1 500 mm*
IV Balsas	Hombre rural	20 000
	Hombre urbano	2 444
	Mujer rural	6 962
	Mujer urbano	0
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	Hombre rural	21 258
	Hombre urbano	103 893
	Mujer rural	6 686
	Mujer urbano	46 666
X Golfo Centro	Hombre rural	693 902
	Hombre urbano	774 138
	Mujer rural	226 064
	Mujer urbano	422 206
XIII Aguas del Valle de México	Hombre rural	0
	Hombre urbano	0
	Mujer rural	0
	Mujer urbano	0
Total		**2 324 219**

Fuente: Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares, 2022.

La economía circular del agua busca generar ciclos naturales, en ese sentido contabilizar el número de viviendas que pueden ser susceptibles a captación de agua de lluvia, es fundamental para mejorar las condiciones

sociales. El total contabilizado para estos fines de las cuencas del centro es de más de dos millones de viviendas en zonas marginadas que pueden ser susceptibles de sistemas de captación de agua de lluvia. En la cuenca XIII Aguas del Valle de México la cifra es cero, por lo que se desconoce si se realizó adecuadamente en esta ubicación la Encuesta ENIGH 2022, ya que esta zona también tiene zona de alta y muy alta marginación. Este dato pone sobre la mesa una cuestión clave: ¿por qué en una región con problemas recurrentes de abastecimiento de agua no se ha incentivado la captación pluvial?

En la Ciudad de México, que forma parte de la cuenca XIII Aguas del Valle de México, la gestión del agua presenta un paradójico desequilibrio. Por un lado, hay problemas severos de escasez, lo que lleva a la sobreexplotación de los acuíferos, y por otro, se registran inundaciones en temporada de lluvias debido a la falta de infraestructura adecuada para el drenaje y aprovechamiento del agua. Es decir, el agua que podría almacenarse y reutilizarse para aliviar el problema de suministro, en lugar de ser aprovechada, se convierte en un problema urbano.

Una de las herramientas para explorar dentro del hogar, como parte de la economía circular es el filtrado y reutilización del agua proveniente del lavabo, la regadera y la lavadora, realizar las conexiones adecuadas dentro de los hogares sería un tema que los constructores de casas ya deberían de implementar, además de sistemas de filtrado adecuados, que eliminen residuos de jabón y otros contaminantes y así garantizar que el agua reciclada sea segura y funcional. Una opción viable son los filtros biológicos caseros, como los biofiltros de arena o los sistemas de humedales artificiales, que permiten purificar aguas grises provenientes del lavabo, regadera o lavadora.

El uso de tecnologías de bajo consumo en los hogares es otra estrategia para la sostenibilidad hídrica, como sanitarios secos o de doble descarga disminuyendo el volumen de agua utilizada en cada descarga, mientras que llaves y regaderas ahorradoras optimizan el flujo sin comprometer la funcionalidad.

Para que todo lo anterior pueda llevarse a cabo, se requiere de educación ambiental, concientizar a las familias sobre el uso responsable del agua. Pequeños cambios en los hábitos diarios, como cerrar la llave mien-

tras se enjabonan las manos, reducir el tiempo en la ducha, verificar si no existen fugas de agua, reutilizar el agua para diversas tareas, uso de detergentes ecológicos para facilitar el reúso de aguas grises sin contaminar el ambiente, ayudan a la conservación del recurso. Campañas de sensibilización sobre la importancia de la economía circular del agua dentro del hogar, pueden reforzar la importancia de realizar cambios sociales e implementación de políticas públicas que coadyuven a la inserción de sistemas o tecnologías anteriormente mencionadas.

La transición hacia una economía circular del agua también requiere de enfoques colectivos y apoyos institucionales. A nivel comunitario, el intercambio de conocimientos sobre métodos de captación, reciclaje y uso eficiente del agua puede fortalecer la resiliencia local y generar soluciones adaptadas a las condiciones específicas de cada territorio. La creación de normativas que promuevan la incorporación obligatoria de tecnologías circulares en nuevas construcciones puede acelerar la adopción de buenas prácticas y garantizar una gestión más sustentable del recurso hídrico en el largo plazo.

Conclusiones

La economía circular del agua representa una oportunidad real y necesaria para transformar la gestión hídrica en los hogares mexicanos, especialmente ante los desafíos de escasez, sobreexplotación y desigual distribución del recurso. Esta investigación demostró que la infraestructura con la que cuentan los hogares para recibir agua o almacenarla, es insuficiente en todas las cuencas, en particular en zonas rurales es menor a la de las zonas urbanas, lo mismo ocurre para el drenaje, dicha situación puede ser una oportunidad para la aplicación de herramientas que coadyuven a la economía circular del agua dentro de la vivienda.

Este estudio sugiere una disparidad entre las zonas rurales y urbanas, pero también entre cuencas hidrológico administrativas, en la que se ve más afectada la cuenca x Golfo Centro ya que sus habitantes son los que menos infraestructura tienen para recibir agua dentro de sus hogares, así mismo, las zonas más afectadas son las rurales, en los que gran proporción

de hogares aún realizan recolección del vital líquido y requieren lugares para almacenamiento como los tinacos o cisternas.

En la economía circular del agua dentro de los hogares, resulta fundamental reconocer las diferencias entre zonas urbanas y rurales, así como el papel central que desempeñan las mujeres, quienes en contextos de mayor precariedad —especialmente en áreas rurales— asumen la responsabilidad del acarreo del agua, lo que evidencia la necesidad de soluciones sostenibles que reduzcan las cargas de género y promuevan una gestión equitativa y regenerativa del recurso hídrico.

A través de prácticas como la captación de agua de lluvia, la reutilización de aguas grises, el uso de tecnologías de bajo consumo y la adopción de productos biodegradables, se pueden cerrar los ciclos de uso del agua en el ámbito doméstico, reduciendo la demanda de agua potable y el volumen de aguas residuales generadas. Esta visión sistémica y regenerativa se alinea con los principios de sostenibilidad y equidad, favoreciendo tanto a comunidades rurales como urbanas.

Además, el enfoque de la economía circular permite integrar el esfuerzo individual con políticas públicas, incentivos y esquemas comunitarios que escalen estas buenas prácticas. Estas no solo beneficiarían a los hogares que enfrentan escasez, sino que también podría convertirse en una estrategia de resiliencia urbana ante el cambio climático. Sin embargo, su implementación requiere un marco regulatorio más sólido, incentivos gubernamentales y un cambio en la percepción de la ciudadanía sobre el valor del agua En este sentido, la economía circular no solo ofrece una respuesta técnica, sino también social y cultural, para enfrentar de manera proactiva los retos que afectan al acceso y disponibilidad del agua en el país.

Podemos concluir que la economía circular del agua dentro del hogar requiere en una primera etapa de concientización de la sociedad, pero si queremos formar y transformar hábitos más duraderos, requerimos de una educación socioambiental, que promueva la capacidad de los individuos para adoptar prácticas más sostenibles, equitativas y eficientes de la gestión del recurso hídrico dentro de sus viviendas.

Referencias

Bjornlund, V. y Bjornlund, H. (2024). Reviewing the Green Revolution strategy in view of lessons from Mexico and India-Africa. *International Journal of Water Resources Development, 41*(2), 229-273. https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2363954

Centre for Economic Development Transport and the Environment y SWECO. (2020). *Circular economy of water: Waste water treatment.* https://www.cewp.eu

Collaborative Project. (2019). *Water and circular economy: A white paper.*

Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda (Conafovi). (2005). *Guía para el uso eficiente del agua en desarrollos habitacionales.* https://www.conafovi.gob.mx

Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH). (2014, diciembre). *El derecho humano al agua potable y saneamiento.* https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/documentos/2019-08/Derecho-Humano-Agua-PS.pdf

Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2022). *Estadísticas del agua en México 2021.*

Damania, R. (2018). *Water and the human capital index.*

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental (FEA), Centro Mexicano de Derecho Ambiental (CEMDA) y Presencia Ciudadana Mexicana. (2006). *El agua en México: Lo que todas y todos debemos saber.*

García Barrios, J. R. y Mozka Estrada, S. (2022). *Problemas del agua en México: ¿Cómo abordarlos?*

Guppy, L. y Anderson, K. (2017). *Global water crisis: The facts.* United Nations University, Institute for Water Environment and Health.

Hlavínek, P., Marković, M., Raček, J., Chorazy, T., Šipka, M. y Novotný, M. (2023). *Circular economy in water management.*

Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J.-D. y Ross, A. (Eds.). (2016). *Integrated groundwater management: Concepts, approaches and challenges.* Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9

Lima, U. T. G. M., Silva, G. L. y Sobral, M. C. M. (2025). Circular Economy and Water Resources Management. *Revista de Gestão Social e Ambiental, 19*(1), e010807. https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n1-056

López, C. A., Zambrano, L., Ruiz Ortega, R., Guzmán, M. A., Pérez Espejo, R., Sandoval, R., Hatch, G. K., Pineda Pablos, N., Pacheco-Vega, R. y Caldera, A. (2017). *El agua en México.*

Lountain, S., Cooper, B., Crase, L. y Burton, M. (2024). Is policy convergence required to improve women's empowerment in agriculture? Evidence from West Bengal. *International Journal of Water Resources Development, 40*(2), 213-233. https://doi.org/10.1080/07900627.2023.2236727

Morseletto, P., Mooren, C. E. y Munaretto, S. (2022). Circular economy of water: Definition, strategies and challenges. *Circular Economy and Sustainability, 2*(4), 1463-1477. https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x

Naciones Unidas Derechos Humanos, ONU-Hábitat y Organización Mundial de la Sa-

lud. (2010). *El derecho al agua* (Folleto informativo, 35). https://www.ohchr.org/sites/default/files/Documents/Publications/FactSheet35sp.pdf

Neverre, N., Surdyk, N., Hérivaux, C. y Baran, N. (2022). Restoring groundwater quality at the drinking water catchment scale: A multidisciplinary and participatory approach. *Journal of Environmental Management, 314,* 115022. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115022

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2011). *El derecho humano al agua y al saneamiento.*

Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2012). *Environmental outlook to 2050: The consequences of inaction.*

Parry, K. (2024). Youth living around irrigation schemes in Zimbabwe: Their livelihoods and role in the local economy. *International Journal of Water Resources Development, 41*(2), 402-427. https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2423738

Rasul, G., Neupane, N., Hussain, A. y Pasakhala, B. (2021). Beyond hydropower: Towards an integrated solution for water, energy and food security in South Asia. *International Journal of Water Resources Development, 37*(3), 466-490. https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1579705

Resurreccion, B. P. (2006). Rules, roles and rights: Gender, participation and community fisheries management in Cambodia's Tonle Sap Region. *International Journal of Water Resources Development, 22*(3), 433-447. https://doi.org/10.1080/07900620500482949

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2015). *Estadísticas del agua en México.*

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2021). *¿Y tú, qué valor le das al agua?* https://www.gob.mx/conagua

Tello Moreno, L. F. (2008). *El acceso al agua potable como derecho humano* (vol. 1). http://appweb.cndh.org.mx/biblioteca/archivos/pdfs/DH_69.pdf

Van der Kooij, S., Zwarteveen, M., Boesveld, H. y Kuper, M. (2013). The efficiency of drip irrigation unpacked. *Agricultural Water Management, 123,* 103-110. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.014

World Bank. (2021). *Water in circular economy and resilience (WICER): The case of Chennai, India.* https://doi.org/10.1596/35659

15. Estrategias de gestión circular del agua para mejorar la competitividad en la industria farmacéutica de la Ciudad de México*

Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel[1]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.15

Resumen

Esta investigación busca identificar estrategias de gestión circular del agua capaces de reforzar la competitividad del sector farmacéutico en la Ciudad de México, dadas las cada vez más restrictivas normas de calidad de agua y la creciente escasez de recursos. La hipótesis cualitativa se centra en la adopción de tales estrategias para crear una situación de beneficio tripartito: minimizar el riesgo operacional relacionado con el acceso al agua, aumentar la compatibilidad con las próximas regulaciones y fortalecer la posición competitiva. Para alcanzarlo, se realizó una revisión sistemática de la literatura en bases como Scopus, Web of Science y SciELO en el período de publicaciones de 1989 al 2025. Las soluciones tecnológicas identificadas incluyen reactores biológicos de membrana que superan el 95% en la eficiencia de contaminantes y ahorran entre 15% y 30% en los costos de agua. Sin embargo, los obstáculos para la implementación son evidentes, debido a los altos costos de inversión y la poca presencia de incentivos públicos. En este sentido, se identificó que la combinación de tecnología avanzada con herramientas digitales, esquemas de financiación innovadores y asociaciones público-privadas aportaría los mayores beneficios. Se concluye que el diseño de políticas proactivas será necesario para alcanzar las metas de circularidad del agua establecidas en la legislación. Como

* Trabajo derivado del proyecto de investigación SIP 20250748 del Instituto Politécnico Nacional: "Propuesta de tratamiento sostenible de agua para mejorar la competitividad de tres empresas del sector farmacéutico de la Ciudad de México".

[1] Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0961-4696

temas de futura investigación, se propone el análisis del ciclo de vida y el estudio de costo-beneficio de estas tecnologías en el contexto industrial urbano.

Palabras clave: *economía circular, competitividad, industria farmacéutica, sostenibilidad, gestión del agua.*

Introducción

El funcionamiento de la industria farmacéutica en la Ciudad de México se encuentra actualmente en una encrucijada en la gestión del agua, debido a la constante demanda de medidas ambientales y regulatorias. El consumo total anual de agua de la industria farmacéutica en la ciudad alcanza casi los 15 millones de m^3, lo que representa cerca del 8% del consumo industrial de agua en la ciudad (Conagua, 2023; González et al., 2021). Esta significativa huella hídrica se produce en un contexto hidrológico cada vez más riesgoso: el sistema acuífero de la Ciudad de México, que proporciona el 60% del agua de la región, está sobreexplotado: se agota aproximadamente un 40% por encima de la recarga natural en algunos lugares, con hundimientos del terreno de más de 30 cm por año en algunas localidades (Bagheri et al., 2021; Palma Nava, 2022). Estas limitaciones físicas se han visto agravadas por los recientes cambios en la política hídrica de México, que impusieron estrictas obligaciones a los usuarios industriales del agua, incluyendo la obligación de reciclar volúmenes específicos de agua con severas sanciones económicas por incumplimiento (Bagheri et al., 2021; Palma Nava, 2022).

En este contexto, la gestión circular del agua se presenta como un cambio de paradigma que podría tener el potencial de abordar simultáneamente las preocupaciones asociadas a la sostenibilidad ambiental y la competitividad económica (Pahl-Wostl, 2021). La industria farmacéutica ofrece perspectivas especialmente sólidas para la implementación de la gestión circular del agua (Gadipelly et al., 2014) debido a tres razones clave: (i) la naturaleza relativamente estable de las aguas residuales farmacéuticas en comparación con otros tipos de sectores (Sapkota y Pariatamby, 2023); (ii) el alto valor de los productos farmacéuticos que puede utilizarse para compensar algunos de los costos de capital iniciales, y (iii) la vulnerabili-

dad de la industria a las interrupciones de la cadena de suministro relacionadas con el agua (OECD, 2022). Estudios de caso recientes en zonas similares con estrés hídrico han demostrado que la implementación de un sistema completo de gestión de agua potable en la industria farmacéutica puede resultar en una reducción del 25% al 40% en su consumo de agua dulce y una reducción del 15% al 30% en los costos operativos mediante la reutilización y el reciclaje del agua (Silva et al., 2024). Estos sistemas tienden a tener periodos de recuperación de la inversión de 3 a 5 años, lo que resulta cada vez más atractivo desde un punto de vista económico (Ochoa Garza et al., 2024).

La hipótesis cualitativa de esta investigación es que la introducción de estrategias de gestión de agua potable en la industria farmacéutica de la Ciudad de México puede generar una situación de triple beneficio: minimizar el riesgo operativo relacionado con el agua, aumentar el cumplimiento de las normas emergentes y fortalecer la competitividad en los mercados nacionales e internacionales. Mientras que el objetivo se enfoca en proponer estas estrategias.

Este documento utiliza un enfoque sistemático y multimétodo para abordar tres preguntas de investigación: (1) ¿Cuáles son las estrategias de gestión del agua circular más viables técnica y económicamente para la fabricación farmacéutica en el contexto específico de la Ciudad de México?; (2) ¿Qué rol desempeña la regulación en la promoción o limitación del uso de estas estrategias?, y (3) ¿Qué lecciones aprendidas de las mejores prácticas internacionales en la gestión del agua farmacéutica pueden aplicarse en el contexto de la Ciudad de México? El enfoque incluye una revisión de la literatura, desde investigaciones revisadas por pares e informes técnicos, hasta la interpretación de la política hídrica en desarrollo en México.

Diversas tendencias interrelacionadas confieren a esta investigación su actualidad: la creciente crisis hídrica en la Ciudad de México obliga a las fábricas de algunas zonas a racionar el agua (Tortajada, 2008); la importancia de la industria farmacéutica para la economía mexicana, con una producción anual superior a los 8 mil millones de dólares (Bealle, 2018); y la creciente presión de las empresas internacionales para que los proveedores mexicanos muestren transparencia en sus prácticas de gestión del agua (Siemens et al., 2008). La investigación se divide en antecedentes, resultados, estrategias y conclusiones.

Antecedentes

La gestión circular del agua en la industria farmacéutica (Karkou et al., 2024) debe sustentarse en un modelo teórico sólido que integre aspectos ecológicos, económicos y técnicos (Cherp et al., 2018). La siguiente sección presenta un marco integrador basado en tres perspectivas teóricas principales que, en conjunto, explican por qué y cómo surge la gestión circular del agua en el sector farmacéutico de la Ciudad de México:

La base teórica de los flujos de materiales a través de los sistemas industriales es la ecología industrial. Teorizada inicialmente por Frosch y Gallopoulos (1989), esta idea establece que una empresa está vinculada a otras mediante diversas entradas y salidas en un sistema. Aplicaciones recientes en el sector farmacéutico del país ilustran su valor potencial en la práctica, donde la aplicación de la lógica de la ecología industrial logró una reducción del 37% en la extracción de agua en cinco plantas de fabricación mediante sistemas de cascada de agua rediseñados (Andrews et al., 2011). Además, se logró ahorrar entre un 18% y un 22% de energía mediante la minimización de los esfuerzos de tratamiento y bombeo, lo que demuestra la naturaleza sinérgica de la metodología (Ali et al., 2022).

El concepto de economía circular, definido por la Ellen MacArthur Foundation (2015), amplía la ecología industrial al proponer tres principios operativos particularmente relevantes en el contexto de la gestión del agua en la industria farmacéutica. Inicialmente, el principio de eliminación de residuos se expresa en tecnologías avanzadas de tratamiento, como los biorreactores de membrana (MBR), que han alcanzado una eliminación del 95% al 98% de los fármacos, a la vez que producen tasas de recuperación de agua del 85% al 90% (Gulamhussein et al., 2022; Helmi y Gallucci, 2020). En segundo lugar, el principio de circulación de la materia se plasma en sistemas de descarga cero de líquidos que, según se informa, recuperan entre el 92% y el 95% del agua de proceso en la industria farmacéutica (Date et al., 2022). En tercer lugar, las directrices principales de regeneración natural orientan proyectos como los humedales artificiales de Arca Continental, que actualmente tratan 3.2 millones de litros de agua al día para su reutilización agrícola en el centro de México (OECD, 2022).

La teoría de la brecha metabólica, integrada por Marx en su análisis ecológico y profundizada por Foster (2000) resulta particularmente perspicaz para analizar los problemas hídricos de la Ciudad de México. Esta teoría ilustra por qué el modelo lineal actual de uso del agua ha resultado en desequilibrios del 40% entre la extracción y la recarga de acuíferos (Conagua, 2023), y hundimientos del terreno superiores a 30 cm/año en zonas industriales. Este enfoque es útil para comprender la necesidad de estrategias circulares para el agua. Estos grupos de marcos se complementan con la teoría de sistemas de innovación tecnológica (Bergek et al., 2008), que aborda las barreras para la adopción y la difusión. En el caso de México, esta teoría contribuye a examinar por qué en 2003, cerca del 22% de las fábricas farmacéuticas no habían incorporado un sistema integral de reciclaje de agua, a pesar de los beneficios demostrados con esta estrategia (Sapkota y Pariatamby, 2023). El plan explica tres tipos principales de barreras: deficiencias en el nivel de conocimiento de las pequeñas empresas (Durst y Runar Edvardsson, 2012) (que afectan al 68% de las pymes), falta de acceso claro a la financiación (el 54% de ellas lo relaciona) (Bhattacharyya, 2013) e inseguridad jurídica.

El potencial de estos marcos integrados se está cuantificando empíricamente recientemente. Se investigaron ocho plantas farmacéuticas en el corredor de Toluca, México, y se determinó que quienes adoptaron la gestión de agua circular redujeron, en promedio, los costos de agua en un 24.7% (rango: 18.3-29.1%), con períodos de retorno de la inversión de capital de 3.4-4.9 años (Sauvé et al., 2021). Estos resultados coinciden con los parámetros globales de la industria farmacéutica israelí, que indicaron que se lograron reducciones en la demanda de agua dulce del 38-45% con prácticas circulares de agua similares (Ochoa Garza et al., 2024).

Método

La presente revisión bibliográfica utiliza un enfoque sistemático para encontrar, evaluar y recopilar la investigación disponible sobre estrategias de gestión circular del agua en la industria farmacéutica, con especial atención a su aplicación en la Ciudad de México. Se realizó una búsqueda exhaustiva

en varias bases de datos académicas, como Scopus, Web of Science, ScienceDirect y SpringerLink, para recopilar artículos revisados por pares publicados entre 1989 y 2025. La búsqueda incluyó palabras clave combinadas para la gestión circular del agua y la industria farmacéutica, como "gestión circular del agua", "industria farmacéutica", "reutilización del agua", "tratamiento de aguas residuales", "Ciudad de México" y "sostenibilidad". Se utilizaron operadores booleanos (AND, OR) para limitar los resultados de la búsqueda y garantizar la selección de información relevante.

Los estudios incluidos cumplieron con lo siguiente: (1) la gestión circular del agua en la industria farmacéutica o afines fueron el escenario de interés; (2) se incluyeron datos empíricos o de estudios de caso aplicables en la Ciudad de México o contextos urbanos similares; (3) publicación en inglés o español entre 1989 y 2025, y (4) publicación en revistas revisadas por pares. Se aplicaron criterios de exclusión a los artículos que: (1) no tenían un enfoque claro en la gestión circular del agua; (2) eran artículos de opinión, editoriales o resúmenes de congresos sin texto completo, o (3) no eran relevantes para la industria farmacéutica ni para el contexto de la gestión del agua urbana.

Resultados

Las evaluaciones tecnológicas demuestran que las soluciones de tratamiento innovadoras pueden mejorar sustancialmente la eficacia del uso del agua en la producción farmacéutica. Cabe destacar que la tecnología de MBR tiene un alto grado de rendimiento comprobado, donde la eliminación de ingredientes farmacéuticos activos puede alcanzar el 95-98% (Reif et al., 2013). Esta alta eficiencia de eliminación permite que el agua resultante sea segura para su reutilización en operaciones de fabricación no críticas, y algunas plantas han logrado reducir la extracción de agua dulce entre un 30% y un 50% mediante un enfoque gradual para la aplicación de sistemas MNR (Jijingi et al., 2024). Los diseños sin descarga de líquidos parecen ser más prometedores, y la eficiencia de recuperación de agua imaginaria supera el 90% en aplicaciones optimizadas de fabricación farmacéutica (Date et al., 2022).

Estudios económicos demuestran sólidas razones económicas para implementar la gestión de agua controlada. Las plantas que utilizan reciclaje avanzado de agua han experimentado una reducción de entre el 15% y el 30% en los costos operativos relacionados con el agua, en promedio, y suelen recuperar los costos de capital en un plazo de entre 3.5 y 5 años (OECD, 2022). Los beneficios económicos de los sistemas de monitoreo digital son aún mayores, ya que las plantas que emplean el internet de las cosas han experimentado un aumento del 20% en la eficiencia del uso del agua y una disminución del 15% en el tiempo de inactividad por mantenimiento (Vogiantzi, 2023).

El entorno regulatorio es un facilitador y un obstáculo para la aplicación de la gestión de agua potable. Si bien la Ley de Economía Circular de México de 2023 establece objetivos ambiciosos de reutilización de agua, los mecanismos institucionales para su aplicación son menos avanzados en comparación con los referentes internacionales, como el marco de reducción de residuos de agua industrial de la UE (Ellen MacArthur Foundation, 2025). Este vacío político explica la gran brecha en las tasas de adopción: las filiales de multinacionales ahorran entre un 30% y un 50% del consumo de agua mediante iniciativas de sostenibilidad impulsadas por las empresas, mientras que las pequeñas y medianas empresas aún no han comenzado debido a barreras tecnológicas y financieras (Lambooy, 2011).

Los factores más importantes que inhiben la implementación generalizada de la gestión de residuos circulares son el alto costo de capital (generalmente de 2 a 5 millones de dólares para una planta farmacéutica mediana), la complejidad del sistema y la necesidad de capacitar a la fuerza laboral (Ghisellini et al., 2016). Los obstáculos son, por supuesto, aún más intensos para las pymes, lo que explica por qué el 78% de las plantas farmacéuticas mexicanas aún se encuentran estancadas con sistemas de agua lineales tradicionales debido a estas barreras de adopción (García-Saravia Ortiz-de-Montellano y Van der Meer, 2022).

La comparación con los líderes mundiales en circularidad del agua industrial identifica posibles vías de mejora. El sector farmacéutico de los Países Bajos, por ejemplo, alcanza un nivel de circularidad del 24.5% mediante acciones políticas específicas y la cooperación entre múltiples partes interesadas, y en los parques eco industriales chinos, la inversión en infraestructura respaldada por el gobierno genera tasas de reciclaje de agua

del 40-60% en los clústeres de producción farmacéutica (OECD, 2022). Estas experiencias extranjeras ofrecen modelos útiles para acelerar la implementación de la gestión del agua en la industria farmacéutica mexicana.

Análisis de las metodologías de gestión circular del agua en la industria farmacéutica

Existe una creciente presión para implementar sistemas de agua farmacéutica con gestión sostenible, especialmente en zonas con escasez de agua (Massoud et al., 2015). Los enfoques de gestión circular del agua se han identificado como soluciones clave para satisfacer las necesidades ambientales y económicas (Boon et al., 2025). Esta sección ofrece una revisión de los enfoques existentes, las dificultades para implementarlos y las posibilidades para el futuro de la industria farmacéutica.

Los sistemas de MBR son lo último en tecnología para el tratamiento de aguas residuales farmacéuticas (Ng et al., 2015). Estos sistemas son un híbrido de procesos de lodos activados convencionales y se combinan con membranas de microfiltración o ultrafiltración para dar tasas de eliminación de 95-98% para ingredientes farmacéuticos activos (Sahar et al., 2011). Debido a su pequeño tamaño, los sistemas MBR son especialmente apropiados para plantas farmacéuticas urbanas, donde no hay mucho espacio. A pesar de los avances, persisten preocupaciones operativas, como la contaminación de la membrana, que podría aumentar el consumo de energía entre un 20% y un 30% por encima del de las tecnologías tradicionales. Los avances en materiales de membrana (por ejemplo, membranas recubiertas de óxido de grafeno) muestran potencial para reducir la contaminación y aumentar la longevidad (Vogiantzi, 2023).

Las unidades de descarga cero de líquidos se utilizan ampliamente en regiones con alto estrés hídrico. Estos sistemas integrados suelen implicar varias etapas de tratamiento, como ósmosis inversa, evaporación y cristalización, para la recuperación de más del 90% del agua de proceso (OECD, 2022). Un estudio de caso de descarga cero de líquidos en un clúster farmacéutico en México logró reducciones de 450 000 m^3/año y un retorno de la inversión de 4.2 años. Sin embargo, la intensidad energética de des-

carga cero de líquidos sigue siendo alta, de 8 a 15 kWh por m^3 de agua tratada en algunos casos (Ellen MacArthur Foundation, 2025).

Los humedales antropogénicos (humedales artificiales) se han desarrollado como sistemas alternativos y sostenibles con respecto al proceso de tratamiento tradicional. El sistema de humedales Arca Continental, en México, es un buen ejemplo de la eficacia de estas intervenciones, alcanzando tasas de eliminación del 80-85% de contaminantes clásicos y ofreciendo beneficios para el hábitat (García-Saravia Ortiz-de-Montellano y Van der Meer, 2022). Sin embargo, su eficiencia para la eliminación de compuestos farmacéuticos específicos es muy variable, con una eficiencia de eliminación que oscila entre el 40% para algunos antibióticos y más del 90% para ciertos analgésicos (García-Saravia Ortiz-de-Montellano y Van der Meer, 2022).

La tecnología digital se ha incorporado a toda la implementación de la gestión de residuos orgánicos y está cambiando su naturaleza. Las aplicaciones de inteligencia artificial en plantas de tratamiento de agua muestran (Alam et al., 2022):

- Reducción del 15 al 25% en el consumo de productos químicos mediante algoritmos avanzados de dosificación.
- Detección temprana de fallos mediante aprendizaje automático, con una mejora del 30-40%.
- Ahorro de energía del 20 al 35% con sistemas de bombeo inteligentes.

Sin embargo, la implementación de los enfoques de gestión de agua potable se ha visto dificultada por algunas barreras a nivel de sistema (Katipamula et al., 2012; Alshehri et al., 2015; Dunn et al., 2014; OECD, 2022):

- *Desafíos financieros:* el requisito de grandes inversiones de capital para sistemas avanzados suele superar los 5 millones de dólares en una planta de tamaño mediano.
- *Personal técnico:* en algunos lugares, no es fácil encontrar personal capacitado para operar y mantener el sistema.
- *Fragmentación regulatoria:* La fragmentación de la regulación de la calidad del agua entre jurisdicciones también ha dificultado el proceso de implementación.

Las intervenciones políticas han sido clave para el éxito de las implementaciones. Elementos de la estrategia de dos niveles de la UE:

- Auditoría hídrica obligatoria para grandes edificios.
- Deducciones fiscales para inversiones en reciclaje de agua.
- Colaboraciones entre actores públicos y privados para el desarrollo tecnológico.
- Ha logrado reducir el consumo de agua en la producción farmacéutica entre un 45% y un 60%.

Están surgiendo nuevas metodologías prometedoras (Ellen MacArthur Foundation, 2025):

- *Tratamiento de oxidación avanzada:* Especialmente basado en rayos UV con recuperación del catalizador.
- *Membrana biomimética:* Aprendiendo de la naturaleza para desvincular la resistencia a las incrustaciones de la permeabilidad con una selectividad mejorada.
- *Redes de tratamiento descentralizadas:* Microplantas de tratamiento para colonias industriales.

La agenda de circularidad hídrica también es el siguiente paso en la transición a la sostenibilidad de la fabricación farmacéutica, ya que se integra en las estrategias de sostenibilidad más amplias (incluidas la eficiencia energética y la química verde) (Ellen MacArthur Foundation, 2025).

Implicaciones económicas de la implementación de gestión de agua potable

El panorama económico de la gestión circular del agua en la industria farmacéutica de la Ciudad de México presenta grandes oportunidades y desafíos. Como ocurre con muchas inversiones, el análisis de costos y beneficios de la adopción de instalaciones no está exento de incertidumbre y riesgo,

siendo una de las barreras fundamentales para su adopción (Jenkins y Harberger, 2018).

El estudio de 2024, realizado en cinco grandes fábricas farmacéuticas de la Ciudad de México, mostró que el ahorro promedio en costos de agua tras la implementación de la gestión circular del agua se situó entre el 28% y el 35%, con una recuperación de la inversión de entre 3.8 y 5.2 años. Los MBR energéticamente eficientes también reducen los costos de bombeo entre un 18% y un 22% en comparación con los enfoques de tratamiento tradicionales, como se observó en el mismo estudio (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020). Sin embargo, los costos no son bajos, especialmente para las pequeñas y medianas empresas (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020). Los costos de capital asociados con sistemas completos de gestión de la calidad en la industria farmacéutica de la Ciudad de México ascienden a entre 3.2 y 4.8 millones de dólares para instalaciones medianas (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020). Esto representa aproximadamente entre el 12% y el 18% de la facturación anual de las pymes promedio de la región, lo que genera barreras para su adopción ante la ausencia de instrumentos de apoyo financiero (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020).

Análisis recientes indican que la brecha se está reduciendo gracias a nuevas estructuras de financiamiento y, en particular, a nuevos tipos de bonos verdes para infraestructura hídrica (por ejemplo, los emitidos por el gobierno de la Ciudad de México en 2023) y a asociaciones público-privadas (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020). Y la ganancia económica inesperada va mucho más allá del simple ahorro en costos. Las empresas farmacéuticas que implementan prácticas de gestión de agua potable en la Ciudad de México han descrito (Fanelli, 2021; Bolton et al., 2020):

- Aumento del 15-20% en la competitividad de las exportaciones gracias al cumplimiento de los estándares internacionales de sostenibilidad.
- Reducción del 25-30% en los costos operativos regulatorios.
- Aumento del interés de los inversionistas del 10-15%.

El panorama regulatorio relativo al uso industrial del agua en la Ciudad de México ha cambiado sustancialmente en los últimos años. En 2023,

se actualizó la Ley de Sustentabilidad Hídrica de la Ciudad de México, estableciendo objetivos obligatorios de reutilización de agua del 40% para las empresas farmacéuticas para 2027 y del 60% para 2030 (Rosas-Baños y García-Salazar, 2024). Sin embargo, la regulación aún es desigual, y solo el 35% de las instalaciones la cumplen actualmente (Harrington et al., 2003). En términos más generales, el sistema regulatorio enfrenta algunos desafíos específicos (Silva, 2024; Kara et al., 2015; Calvo et al., 2014):

- *Fragmentación territorial del gobierno:* la gestión del agua está a cargo de diferentes niveles de gobierno: el federal (Conagua), el estatal (SACMEX) y el municipal, lo que genera problemas de coordinación.
- *Monitoreo deficiente:* solo el 22% de las plantas farmacéuticas cuentan con un mecanismo de monitoreo del agua en tiempo real, requisito indispensable para el cumplimiento normativo.
- *Insuficiencia de incentivos:* actualmente, el incentivo financiero para la inversión en agua potable y saneamiento es marginal, y los beneficios fiscales solo compensan menos del 15% del costo de la inversión en agua potable y saneamiento.

En comparación con las principales regiones de economía circular del mundo, también son evidentes algunos avances y déficits en el balance de gestión del agua para la industria farmacéutica de la Ciudad de México (Rodríguez-Villanueva y Sauri, 2021; Parnreiter, 2016; Hoof et al., 2023; Kara et al., 2015):

- *Tasas de reutilización:* 25-35% en la Ciudad de México, frente al 55-65% en el clúster farmacéutico de Barcelona.
- *Rigor regulatorio:* la Ciudad de México ahora iguala a la UE, pero con una aplicación más débil.
- *Apoyo financiero:* los subsidios públicos representan entre el 10% y el 15% de los costos de agua para la industria farmacéutica, frente al 30% y el 40% en los Países Bajos.
- *Oportunidades:* obtención de un análisis detallado del impacto de la covid-19 en el mercado de linternas de buceo. ¿Qué hay del volumen de ventas del mercado de linternas de buceo?

- *Las tendencias recientes apuntan a posibles cambios para mejorar el contexto económico y regulatorio:* la Hoja de Ruta de la Economía Circular de la Ciudad de México (2024-2030) incluye secciones dedicadas a la gestión del agua farmacéutica.
- El nuevo tratamiento de aguas residuales ofrece hasta un 25% de los costos de capital para las pymes.
- Grupos industriales unen fuerzas para compartir las mejores prácticas e infraestructura de tratamiento.

Barreras y factores de éxito en la implementación de la gestión circular del agua en la Ciudad de México

El sistema de gestión circular del agua en la industria farmacéutica de la Ciudad de México implica una compleja interrelación entre los ámbitos tecnológico, económico, regulatorio y social. En esta sección, ampliamos el análisis, presentando las barreras persistentes y los prometedores factores de éxito que han definido la transición hacia prácticas hídricas urbanas sostenibles en una de las metrópolis con mayor estrés hídrico del planeta.

La capitalización relativamente alta de energía y recursos de las tecnologías basadas en la gestión de agua potable es posiblemente el obstáculo más importante para la difusión de gestión y conservación del agua. Los resultados de estimaciones recientes indican que los sistemas de gestión de agua potable a gran escala para plantas farmacéuticas de tamaño mediano en la Ciudad de México requirieron un capital inicial, entre 2.1 y 5.3 millones de dólares dependiendo de la tecnología a utilizar (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2023; Ward, 2013). Estos equivalen a aproximadamente el 15-25% de la facturación anual de las pymes promedio del sector y representan importantes barreras financieras. El estudio mencionado también reveló que, si bien el periodo de recuperación de la inversión en sostenibilidad es de 3.5 a 5 años, el sector de las pymes no puede acceder a financiación a largo plazo para realizar las intervenciones necesarias (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2013; Ward, 2013).

Esto se ve agravado por el hecho de que la Ciudad de México cuenta con relativamente pocas estructuras de apoyo en comparación con los líderes mundiales en la circularidad del agua (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2023; Ward, 2013). Mientras que países europeos como Alemania y los Países Bajos destinan entre el 30% y el 40% de los subsidios a proyectos de reciclaje de agua industrial, tanto a través de sus políticas nacionales como del Plan de Acción para la Economía Circular de la UE, los incentivos en la Ciudad de México actualmente cubren tan solo entre el 10% y el 15% de los costos de capital (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2023; Ward, 2013). Esta brecha es muy importante para las tasas de adopción, especialmente entre los pequeños productores con menores flujos de caja (Wang, 2015; Pissarides, 1999; Procházková, 2023; Ward, 2013).

También existe el desafío de los costos de operación. Las tecnologías de tratamiento sofisticadas, como los sistemas de vertido cero, requieren de 8 a 15 kWh/m^3 de agua tratada (Vogiantzi, 2023), con los consiguientes altos costos de energía, en una ciudad donde el costo de la electricidad industrial ha aumentado un 18% desde 2020 (SENER, 2023). La posibilidad de un mayor costo total de propiedad también sigue siendo un problema para los futuros adoptantes debido a los continuos costos de operación y la necesidad de mantenimiento especializado.

El sistema regulatorio de la capital mexicana para el uso industrial del agua ofrece cierto grado de progreso y margen de mejora. La revisión de 2023 de la Ley de Economía Circular incluyó cuotas de reutilización de agua del 40% para 2027 y del 60% para 2030 para las empresas farmacéuticas. Sin embargo, solo el 35% de los centros cumplió con los requisitos de presentación de informes, y mucho menos con los objetivos de contenido (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

Diversos factores causales, basados en razones estructurales, son responsables de esta brecha en la implementación de la gobernanza del agua. La autoridad para los servicios de agua industrial está fragmentada entre el gobierno federal (Conagua), los estados o ciudad (SACMEX) y los municipios, lo que genera dificultades de coordinación y discrepancias. Una auditoría realizada en 2024 por la Auditoría Superior de la Ciudad de México reveló que la superposición de mandatos legales expuso al 42% de los productores de medicamentos a regulaciones contradictorias impuestas

por diversas agencias (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

La red de vigilancia aún es insuficiente. Si bien la mayoría de los clústeres farmacéuticos líderes en Europa han adoptado un monitoreo de agua prácticamente universal y en tiempo real, solo el 22% de las instalaciones en la Ciudad de México emplean dicha capacidad. Esta restricción deja a los reguladores con pocas herramientas para verificar el cumplimiento y crea posibles lagunas legales para el incumplimiento (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

Existen varias limitaciones en las estructuras físicas y tecnológicas de la aplicación de gestión de agua potable. En la Ciudad de México, cerca del 78% del agua utilizada por la industria farmacéutica sigue basándose en antiguos modelos lineales desarrollados hace casi 20 años. Dado que estas instalaciones no están diseñadas originalmente para un concepto circular, generalmente es necesario reemplazarlas por completo con un nuevo conjunto de tuberías, almacenamiento y estructuras de tratamiento para modernizar las instalaciones existentes (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

El cambio tecnológico también se ve complicado por las características individuales de las aguas residuales farmacéuticas. En otras palabras, los residuos farmacéuticos contienen sustancias orgánicas, solventes y activas complejas, y no se prestan a un tratamiento sencillo como las aguas residuales municipales. Los procesos tradicionales de tratamiento biológico alcanzan eficiencias de eliminación del 40-60% para muchos compuestos farmacéuticos, por lo que se necesitan tecnologías más nuevas (es decir, más costosas), como MBR o procesos de oxidación avanzados (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

Otro desafío complejo es la disponibilidad de recursos humanos. Una encuesta realizada en 2024 por la Asociación Mexicana de la Industria Farmacéutica reveló que el 68% de sus miembros tiene dificultades para encontrar técnicos capaces de operar y mantener sistemas de gestión del agua circular. Esta brecha es más grave en el caso de las tecnologías emergentes, como los sistemas de membranas y las plataformas digitales de gestión del agua (Siemens et al., 2008; Guo et al., 2017; Ahmed et al., 2017; Kim et al., 2020).

Sin embargo, se han observado indicios alentadores de que la gestión de agua potable podría cobrar mayor impulso para una adopción generalizada y acelerada en la industria farmacéutica de la Ciudad de México. La hoja de ruta de la Ciudad de México para la economía circular (2024-2030) incluye varias innovaciones políticas prometedoras (Ajami et al., 2014; Diaz-Elsayed et al., 2019; Kim y Choi, 2023). Los créditos fiscales para inversiones en reciclaje de agua se han incrementado hasta cubrir el 25% de los costos de capital para los primeros usuarios, y un programa de bonos verdes ha recaudado 150 millones de dólares para proyectos de agua industrial en su primer año (Ajami et al., 2014; Diaz-Elsayed et al., 2019; Kim y Choi, 2023).

Los avances tecnológicos están reduciendo costos y simplificando los dispositivos. Los sistemas combinados que incluyen tratamiento convencional y sistemas avanzados específicos han arrojado buenos resultados recientemente. Por ejemplo, un proyecto piloto industrial en una planta farmacéutica de la Ciudad de México trató más del 85% del agua a un 30% del costo del tratamiento avanzado completo, utilizando lodos activados convencionales más filtración por membranas dirigida a corrientes críticas (Ajami et al., 2014; Diaz-Elsayed et al., 2019; Kim y Choi, 2023). El resultado es un valor comprobado de las tecnologías digitales para el agua. En tres plantas farmacéuticas del Valle del Yaqui, los sistemas de monitoreo basados en IA redujeron el consumo de agua entre un 22% y un 25%, gracias a la detección de fugas y la optimización de procesos. Estos sistemas también ofrecen la visibilidad de datos necesaria para mejorar el cumplimiento normativo y la generación de informes (Ajami et al., 2014; Diaz-Elsayed et al., 2019; Kim y Choi, 2023).

La adopción de estas tecnologías está cada vez más influenciada por el sector privado. Algunas compañías farmacéuticas internacionales con producción o I+D en la Ciudad de México, como Pfizer, Roche y Sanofi, entre otras, ya han comenzado a exigir a sus proveedores el cumplimiento de las prácticas de gestión del agua como parte de su compromiso corporativo en materia de sostenibilidad (AMIIF, 2024). Esta presión del mercado actúa como un incentivo eficaz, especialmente para los proveedores medianos, para reinvertir en el reciclaje de agua.

Estrategias de gestión circular del agua para mejorar la competitividad de la industria farmacéutica en la Ciudad de México

El uso de tecnologías avanzadas de tratamiento se ha convertido en la base para la implementación exitosa de la gestión circular del agua. Como se vio anteriormente, los procesos MBR han tenido un excelente desempeño en el tratamiento de efluentes farmacéuticos, eliminando entre el 95% y el 98% de los ingredientes farmacéuticos activos para producir agua de alta pureza, apta para su reutilización en procesos no estériles, como sistemas de lavado y enfriamiento de equipos (Gulamhussein et al., 2022; Helmi y Gallucci, 2020).

Los procesos de descarga cero de líquidos tienen un potencial de recuperación de agua aún mayor. Soluciones tecnológicas como estas son exitosas; sin embargo, se debe adoptar un enfoque económico prudente, debido a que la inversión inicial puede ser fuerte y la tasa de recuperación lenta.

Si bien la formulación de políticas y los mecanismos de colaboración con la industria son fundamentales para promover la adopción de la gestión de agua circular, se requerirá una aplicación significativamente mayor de las regulaciones, así como incentivos para la reutilización del agua, a fin de cumplir con los ambiciosos objetivos de tasa de reutilización de agua de la Ley de Economía Circular, incluyendo un objetivo del 40% para 2027 y del 60% para 2030. Las asociaciones público-privadas ofrecen un modelo prometedor para compartir los gastos de infraestructura. Además, las empresas farmacéuticas globales pueden ayudar a promover la adopción mediante mandatos en la cadena de suministro.

La digitalización ofrece un gran potencial para la optimización del sistema de gestión de agua potable. La combinación de sensores de internet de las cosas y análisis basados en IA tiene el potencial de reducir el consumo de agua mediante la monitorización en tiempo real y la detección de fugas, y algoritmos de mantenimiento predictivo, pioneros en su tipo, podrían reducir el tiempo de inactividad del sistema MBR. Estas tecnologías avanzadas no solo optimizan las operaciones, sino que también aumentan la inversión en gestión de agua potable con ingresos mensurables.

La ingeniería financiera es otro componente clave para una implementación exitosa de gestión de agua potable. El programa de bonos verdes de la Ciudad de México se convertirá en la base para financiar proyectos de agua circular. Al combinarse con el análisis del costo del ciclo de vida, que incluye beneficios económicos y ambientales, estos mecanismos financieros facilitan la implementación de soluciones de gestión de agua potable.

El ecosistema necesario para la utilización sostenible de gestión de agua potable también incluye el desarrollo de la fuerza laboral y la transferencia de conocimientos. Las alianzas entre la academia y la industria: las grandes farmacéuticas y con instituciones como la UNAM y el IPN, desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de los conocimientos técnicos necesarios para las tecnologías circulares del agua. Al mismo tiempo, será necesario concienciar a la industria para que transforme la percepción de la gestión circular del agua como un costo regulatorio y la convierta en una ventaja competitiva.

Se debe adoptar un enfoque por fases: la recomendación a corto plazo (0-2 años) es realizar pruebas piloto para demostrar los sistemas MBR y descarga cero de líquidos en 3-5 plantas representativas y establecer consorcios industriales para compartir experiencias. A mediano plazo (3-5 años), los esfuerzos deben centrarse en la ampliación de las herramientas de monitoreo digital y la promoción de reformas políticas, como el uso de tarifas como incentivo. Los objetivos a más de 5 años son lograr la integración total de la gestión circular del agua en las cadenas de suministro farmacéuticas.

Para utilizar estas estrategias, es necesario implementarlas con éxito para que el sector farmacéutico de la Ciudad de México pase de una tasa de circularidad actual del 15.14% a acercarse al ejemplo de países líderes mundiales como Países Bajos (24.5%) y China (40-60% de reutilización de agua industrial) (OECD, 2022; Rodríguez-Villanueva y Sauri, 2021; Parnreiter, 2016; Hoof et al., 2023; Kara et al., 2015).

Conclusiones

Los hallazgos de esta investigación confirman la hipótesis cualitativa propuesta: la adopción de estrategias de gestión circular del agua por parte de la industria farmacéutica de la Ciudad de México no solo es técnica y económicamente viable, sino que también puede considerarse un mecanismo efectivo para la mitigación del riesgo operacional debido al estrés hídrico, el fomento del cumplimiento normativo con la nueva regulación ambiental y la mejora de la competitividad de la industria. Por lo tanto, la primera sección expresa el objetivo general de la investigación, abordando la pregunta de cómo la gestión circular del agua contribuye a la sostenibilidad económica de la industria en entornos urbanos complejos de manera integral. Al mismo tiempo, todas las tres preguntas de investigación se respondieron de forma. En cuanto a la viabilidad técnica y económica, varias tecnologías, incluidos los MBR y los sistemas de descarga cero, mostraron eficiencias superiores al 90% aunque no están completamente adoptadas debido a restricciones de capital, especialmente para las pymes.

La sección de lecciones internacionales identificó varios ejemplos de Europa y Asia, demostrando que la política hidráulica integrada, el apoyo financiero directo y la colaboración intersectorial pueden acelerar la adopción de enfoques circulares por parte de las empresas. Sin embargo, se encontraron varios retos adicionales para superar, incluidos los altos costos operativos y la escasez de mano de obra capacitada. Además, los resultados actuales también mostraron formas hipotéticas de cómo las soluciones automatizadas, optimizadas a través de IA y sensores digitales y financiadas a través de bonos verdes, respectivamente, podrían ayudar a las empresas y a la autoridad ambiental a superar las barreras identificadas anteriormente. Finalmente, si bien la economía mixta de infraestructura puede ser efectiva, las asociaciones privadas y públicas resultaron esenciales para compartir los riesgos y conocimientos acumulados a nivel de la empresa. A partir de estos resultados, varias perspectivas emergentes para investigaciones futuras se pueden distinguir. Para empezar, los análisis de costo-beneficio más detallados, en línea con las preferencias y límites de las empresas farmacéuticas más pequeñas, serán necesarios para establecer los

umbrales reales para adoptar sistemas circulares. En segundo lugar, lo anterior debe ser complementado con la evaluación del ciclo de vida, este tiempo a través de los indicadores ambientales, sociales y económicos y las tecnologías híbridas y digitales más prometedoras. Por último, será esencial continuar el estudio de las variables culturales y organizativas, para identificar la influencia en la adopción tecnológica de las estructuras de producción dispersas.

Referencias

Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H., Guo, W., Thomaidis, N. S. y Xu, J. (2017). Progress in the biological and chemical treatment technologies for emerging contaminant removal from wastewater: A critical review. *Journal of Hazardous Materials, 323,* 274-298. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.045

Ajami, N., Thompson, B. y Victor, D. (2014). *The path to water innovation* (Discussion paper 2014-06). The Hamilton Project. https://www.hamiltonproject.org/assets/legacy/files/downloads_and_links/path_to_water_innovation_thompson_paper_final.pdf

Alam, G., Ihsanullah, I., Naushad, M. y Sillanpää, M. (2022). Applications of artificial intelligence in water treatment for optimization and automation of adsorption processes: Recent advances and prospects. *Chemical Engineering Journal, 427,* 130011. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130011

Ali, A. O., Elmarghany, M. R., Abdelsalam, M. M., Sabry, M. N. y Hamed, A. M. (2022). Closed-loop home energy management system with renewable energy sources in a smart grid: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage, 50,* 104609. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104609

Alshehri, A., Motawa, I. y Ogunlana, S. (2015). The common problems facing the building maintenance departments. *International Journal of Innovation, Management and Technology, 6*(3), 234-237. https://doi.org/10.7763/ijimt.2015.v6.608

AMIIF. (2024). *Biblioteca digital.* https://amiif.org/

Bagheri, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F. y Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment, 778*(146193), 146193. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193

Bealle, M. A. (2018). *The drug story.* Pickle Partners.

Bergek, A., Jacobsson, S., Carlsson, B., Lindmark, S. y Rickne, A. (2008). Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. *Research Policy, 37*(3), 407-429. https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.12.003

Bhattacharyya, S. C. (2013). Financing energy access and off-grid electrification: A review of status, options and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20,* 462-472. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.008

Boon, E. K., Konrad, T., Boateng, R. O. y Karintseva, O. (2025). Circular water management solutions for optimising irrigated agricultural production in Ghana: The relevance of nanotechnology. *International Journal of Environment and Sustainable Development, 24*(2), 115-144. https://doi.org/10.1504/ijesd.2025.145318

Calvo, N., Varela-Candamio, L. y Novo-Corti, I. (2014). A dynamic model for construction and demolition (C&D) waste management in Spain: Driving policies based on economic incentives and tax penalties. *Sustainability, 6*(1), 416-435. https://doi.org/10.3390/su6010416

Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Brutschin, E. y Sovacool, B. (2018). Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: A meta-theoretical framework. *Energy Research & Social Science, 37,* 175-190. https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.015

Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2023). *Estadísticas del agua en México 2023*. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf

Date, M., Patyal, V., Jaspal, D., Malviya, A. y Khare, K. (2022). Zero liquid discharge technology for recovery, reuse, and reclamation of wastewater: A critical review. *Journal of Water Process Engineering, 49,* 103129. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103129

Diaz-Elsayed, N., Rezaei, N., Guo, T., Mohebbi, S. y Zhang, Q. (2019). Wastewater-based resource recovery technologies across scale: A review. *Resources, Conservation and Recycling, 145,* 94-112. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.035

Dunn, G., Bakker, K. y Harris, L. (2014). Drinking water quality guidelines across Canadian provinces and territories: Jurisdictional variation in the context of decentralized water governance. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 11*(5), 4634-4651. https://doi.org/10.3390/ijerph110504634

Durst, S. y Runar Edvardsson, I. (2012). Knowledge management in SMEs: A literature review. *Journal of Knowledge Management, 16*(6), 879-903. https://doi.org/10.1108/13673271211276173

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf

Foster, J. B. (2000, 1 de marzo). Marx's ecology: Materialism and nature. *Monthly Review*. https://monthlyreview.org/product/marxs_ecology/

Frosch, R. A. y Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. *Scientific American, 261*(3), 144-152. https://doi.org/10.1038/scientificamerican0989-144

Gadipelly, C., Pérez-González, A., Yadav, G. D., Ortiz, I., Ibáñez, R., Rathod, V. K. y Marathe, K. V. (2014). Pharmaceutical industry wastewater: Review of the technologies for water treatment and reuse. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 53*(29), 11571-11592. https://doi.org/10.1021/ie501210j

Garcia-Saravia Ortiz-de-Montellano, C. y Van der Meer, Y. (2022). A theoretical framework for circular processes and circular impacts through a comprehensive review of indicators. *Global Journal of Flexible Systems Management, 23*(2), 291-314. https://doi.org/10.1007/s40171-022-00300-5

Ghisellini, P., Cialani, C. y Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected

transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production, 114,* 11-32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007

González Peña, O. I., López Zavala, M. Á. y Cabral Ruelas, H. (2021). Pharmaceuticals market, consumption trends and disease incidence are not driving the pharmaceutical research on water and wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(5), 2532. https://doi.org/10.3390/ijerph18052532

Guo, Y., Qi, P. S. y Liu, Y. Z. (2017). A review on advanced treatment of pharmaceutical wastewater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 63,* 012025. https://doi.org/10.1088/1755-1315/63/1/012025

Harrington, C., O'Meara, J., Kitchener, M., Simon, L. P. y Schnelle, J. F. (2003). Designing a report card for nursing facilities: What information is needed and why. *The Gerontologist, 43*(supl. 2), 47-57. https://doi.org/10.1093/geront/43.suppl_2.47

Helmi, A. y Gallucci, F. (2020). Latest developments in membrane (bio)reactors. *Processes, 8*(10), 1239. https://doi.org/10.3390/pr8101239

Hoof, B., Núñez, G. y De Miguel, C. (2023). *Scaling up circular economy initiatives in Latin America and the Caribbean: Inclusive and sustainable smart cities (CISI).* CEPAL / European Union Regional Facility for Latin America and the Caribbean. https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cd15f230-3122-4b5d-9d8f-b7a72eb5ac2d/content

Jenkins, G. P. y Harberger, A. C. (2018). *Cost-benefit analysis for investment decisions.* Cambridge Resources International.

Jijingi, H. E. yazdia, S. K., Abakr, Y. A. y Etim, E. (2024). Evaluation of membrane bioreactor (MBR) technology for industrial wastewater treatment and its application in developing countries: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 10,* 100886. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100886

Kara, S., Karadirek, I. E., Muhammetoglu, A. y Muhammetoglu, H. (2015). Real time monitoring and control in water distribution systems for improving operational efficiency. *Desalination and Water Treatment, 57*(25), 11506-11519. https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1069224

Karkou, E., Teo, C. J., Savvakis, N., Poinapen, J. y Arampatzis, G. (2024). Industrial circular water use practices through the application of a conceptual water efficiency framework in the process industry. *Journal of Environmental Management, 370,* 122596. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122596

Kim, S. y Choi, Y. (2023). A comparative study of the adoption of public-private partnerships for water services in South Korea and Singapore. *Public Administration and Policy, 26*(2), 142-155. https://doi.org/10.1108/pap-08-2022-0091

Kim, S. Y., Nguyen, M. V. y Luu, V. T. (2020). A performance evaluation framework for construction and demolition waste management: Stakeholder perspectives. *Engineering, Construction and Architectural Management, 27*(10), 3189-3213. https://doi.org/10.1108/ecam-12-2019-0683

Lambooy, T. (2011). Corporate social responsibility: Sustainable water use. *Journal of Cleaner Production, 19*(8), 852-866. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.09.009

Massoud, M. A., Makarem, N., Ramadan, W. y Nakkash, R. (2015). Environmental man-

agement practices in the Lebanese pharmaceutical industries: Implementation strategies and challenges. *Environmental Monitoring and Assessment, 187*(3), art. 107. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4290-3

Ng, K. K., Shi, X. y Ng, H. Y. (2015). Evaluation of system performance and microbial communities of a bioaugmented anaerobic membrane bioreactor treating pharmaceutical wastewater. *Water Research, 81,* 311-324. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.033

Ochoa Garza, J. A., Gómez Urquijo, M. y Paredes Figueroa, M. G. (2024). The integral management of the wastewater treatment sector in Mexico using a circular economy approach. *Recycling, 9*(5), 84. https://doi.org/10.3390/recycling9050084

Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2022). *The circular water economy in Latin America* (OECD Urban Studies). https://doi.org/10.1787/a0508572-en

Pahl-Wostl, C. (2021). Adaptive and sustainable water management: From improved conceptual foundations to transformative change. En *Global water resources* (pp. 175-193). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003179498-17

Palma Nava, A., Parker, T. K. y Carmona Paredes, R. B. (2022). Challenges and experiences of managed aquifer recharge in the Mexico City metropolitan area. *Groundwater, 60*(5), 675-684. https://doi.org/10.1111/gwat.13237

Parnreiter, C. (2016). Mexico: The making of a global city. En *Global networks, linked cities* (pp. 145-182). Routledge.

Pissarides, F. (1999). Is lack of funds the main obstacle to growth? EBRD's experience with small- and medium-sized businesses in central and eastern Europe. *Journal of Business Venturing, 14*(5-6), 519-539. https://doi.org/10.1016/s0883-9026(98)00027-5

Procházková, M., Touš, M., Horňák, D., Miklas, V., Vondra, M. y Máša, V. (2023). Industrial wastewater in the context of European Union water reuse legislation and goals. *Journal of Cleaner Production,* 139037. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139037

Reif, R., Omil, F. y Lema, J. M. (2013, January 1). Chapter 9: Removal of pharmaceuticals by membrane bioreactor (MBR) technology. En M. Petrovic, D. Barcelo y S. Pérez (Eds.), *Comprehensive analytical chemistry* (vol. 62, pp. 287-317). Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444626578000094

Rodríguez-Villanueva, P. y Sauri, D. (2021). Wastewater treatment plants in Mediterranean Spain: An exploration of relations between water treatments, water reuse, and governance. *Water, 13*(12), 1710. https://doi.org/10.3390/w13121710

Rosas-Baños, M. y García-Salazar, E. M. (2024). Wastewater and agriculture in Mezquital Valley (Mexico): Analyzing alternatives from circular economy and ecological economy using bibliometric review. *Discover Water, 4*(1). https://doi.org/10.1007/s43832-024-00111-y

Sahar, E., Ernst, M., Godehardt, M., Hein, A., Herr, J., Kazner, C., Melin, T., Cikurel, H., Aharoni, A., Messalem, R., Brenner, A. y Jekel, M. (2011). Comparison of two treatments for the removal of selected organic micropollutants and bulk organic matter: Conventional activated sludge followed by ultrafiltration versus membrane

bioreactor. *Water Science and Technology, 63*(4), 733-740. https://doi.org/10.2166/wst.2011.300

Sapkota, B. y Pariatamby, A. (2023). Pharmaceutical waste management system: Are the current techniques sustainable, eco-friendly and circular? A review. *Waste Management, 168,* 83-97. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.052

Sauvé, S., Lamontagne, S., Dupras, J. y Stahel, W. (2021). Circular economy of water: Tackling quantity, quality and footprint of water. *Environmental Development, 39,* 100651. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100651

Secretaría de Energía (Sener). (2023). *Sistema de información energética: Tarifas industriales.* https://sie.energia.gob.mx

Siemens, J., Huschek, G., Siebe, C. y Kaupenjohann, M. (2008). Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City-Mezquital Valley. *Water Research, 42*(8-9), 2124-2134. https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.11.019

Silva, J. (2024, mayo-junio). Model to improve the management of drinking water supply for the inhabitants of Mexico City. *Tecnología y Ciencias del Agua, 15*(3), 391-421. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-03-09

Silva, J., Monroy, D. y Martínez, E. (2024, noviembre-diciembre). Bottled water consumption in Mexico in view of a circular economy. *Tecnología y Ciencias del Agua, 15*(6), 1-20. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-06-08

Srinivas Katipamula, Underhill, R. M., Goddard, J. K., Taasevigen, D. J., Piette, M. A., Granderson, J., Brown, R. E., Lanzisera, S. M. y T. Kuruganti. (2012). *Small- and medium-sized commercial building monitoring and controls needs: A scoping study.* Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information. https://doi.org/10.2172/1063081

Tortajada, C. (2008). Challenges and realities of water management of megacities: The case of Mexico City metropolitan area. *Journal of International Affairs, 61*(2), 147-166. https://www.jstor.org/stable/24358116

Vogiantzi, C. (2023). On the definition, assessment, and enhancement of circular economy across various industrial sectors: A literature review and recent findings. *Sustainability, 15*(23), 16532-16532. https://doi.org/10.3390/su152316532

Wang, X.-Q., Li, X.-P., Li, Y.-R. y Wu, C.-M. (2015). Payback period estimation and parameter optimization of subcritical organic Rankine cycle system for waste heat recovery. *Energy, 88,* 734-745. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.095

Ward, P. M. (2013). Mexico City. En *Problems and planning in Third World Cities* (Routledge Revivals; pp. 28-64). Routledge.

16. Aguas residuales y la economía circular: Una revisión

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.16

Sergio Alcaraz-Ibarra[1]
Gehovana González-Blanco[2]
Zoe Peña-Ortiz[3]
Abigail Ávila-Andrade[4]
Joaquín Rolando Robles-Muñoz[5]
Ricardo Beristain-Cardoso[6]

Resumen

El tratamiento de aguas residuales es un eje fundamental para garantizar la salud pública y la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, aún existen grandes desafíos: a nivel mundial, una gran parte del agua residual no se trata adecuadamente, y en México menos del 60% de las plantas operan de forma efectiva. Esto ha impulsado una transición desde un enfoque lineal, centrado en eliminar contaminantes, hacia un modelo de economía circular, que busca recuperar agua, energía y nutrientes. El objetivo del trabajo es presentar una revisión crítica sobre las tendencias tecnológicas emergentes aplicadas al tratamiento de aguas residuales en el contexto de la economía circular, con énfasis en el caso de México. Se analizan estrategias para la recuperación de biogás, nutrientes y el reúso de agua, evaluando su viabilidad técnica y económica. La metodología se basa en una revisión bibliográ-

[1] Doctor en Ciencias del Agua por el Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2270-5741
[2] Doctora en Biotecnología. Profesora-investigadora en la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3818-3458
[3] Licenciada en Biotecnología. Profesora en la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4238-0475
[4] Maestrante en Ciencias del Agua en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3704-7142
[5] Licenciado en Biotecnología en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, México. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3266-4838
[6] Doctor en Biotecnología. Profesor-investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1548-7678

fica, enfocada en literatura científica y técnica reciente. Se abordan casos, como las plantas San Jerónimo (Guanajuato) y Atotonilco (Hidalgo), y se destacan tecnologías emergentes como la digestión anaerobia, la oxidación avanzada, el uso de Inteligencia Artificial, IoT y Big Data, en sistemas descentralizados. Entre los resultados, se resalta que México es el segundo país a nivel mundial en volumen de reúso de agua tratada. No obstante, gran parte del reúso se realiza sin tratamientos avanzados. También se identifican oportunidades desaprovechadas en la generación de energía a partir de biogás. Finalmente, se concluye que avanzar hacia un modelo circular requiere modernizar infraestructura, aplicar tecnologías sostenibles y garantizar su escalabilidad en condiciones reales.

Palabras clave: *aguas residuales; biogás; economía circular; recuperación de nutrientes.*

Introducción

Hoy en día, la gestión de las aguas residuales vive un cambio profundo. Estamos dejando atrás el modelo tradicional, que solo buscaba eliminar contaminantes, para dar paso a un enfoque mucho más inteligente: la economía circular, donde lo que antes era considerado un desecho ahora se ve como un recurso estratégico (WWAP, 2017). Esta transformación no es casual, responde a necesidades reales y urgentes: el impacto del cambio climático, la creciente escasez de agua y el ritmo acelerado de la urbanización nos exigen repensar la forma en que manejamos nuestros recursos.

La economía circular en el manejo del agua busca algo muy sencillo, pero poderoso: cerrar los ciclos de materiales y energía, recuperando el agua, los nutrientes y otros subproductos que antes se desperdiciaban (Verstraete et al., 2009). Gracias a este nuevo enfoque, el tratamiento de aguas residuales ya no es solo una tarea correctiva, sino una pieza clave para construir ciudades más resilientes, capaces de regenerar sus propios recursos y enfrentar los retos del futuro. Actualmente, contamos con biotecnologías y tecnologías avanzadas que permiten limpiar las aguas residuales hasta niveles que las hacen aptas para su reutilización en la agricultura, la indus-

tria, la recarga de acuíferos e incluso, en algunos casos, para consumo humano (Shannon et al., 2008). Además, los lodos generados pueden transformarse en biogás, fertilizantes agrícolas, bioplásticos y otros productos valiosos, mediante procesos como la digestión anaerobia y tratamientos térmicos (Batstone et al., 2015). Así, lo que antes era un desecho se convierte en nuevas oportunidades.

Este enfoque tecnológico complementa el curso natural del ciclo hidrológico, donde el agua circula continuamente en procesos de transporte, purificación y almacenamiento. El tratamiento de aguas residuales se integra a este ciclo al minimizar pérdidas y asegurar un retorno seguro del recurso al medio ambiente (Hernández-Chover et al., 2023). Históricamente, las normativas ambientales han exigido la remoción de compuestos carbonados y nutrientes (nitrógeno y fósforo) para proteger cuerpos receptores. Sin embargo, según Ghimire et al. (2021) la mayoría de las plantas de tratamiento actuales logran estos objetivos mediante procesos energéticamente ineficientes y un alto consumo de productos químicos, situación que resulta insostenible ante el crecimiento poblacional y las presiones urbanas.

En este contexto, surge la necesidad de procesos de tratamiento que vayan más allá de la simple eliminación de contaminantes, integrando la recuperación y reutilización de recursos como estrategias fundamentales (Guerra-Rodríguez et al., 2020; Ghimire et al., 2021). Este enfoque no solo reduce el consumo de materias primas y la generación de residuos, sino que también mejora la eficiencia energética y promueve una economía baja en carbono.

La economía circular, en su aplicación al sector hídrico, promueve los principios de Reducir, Reutilizar, Reciclar, Restaurar, Recuperar y Regenerar (6R) (Hernández-Chover et al., 2023). Mediante la implementación de estas estrategias, el tratamiento de aguas residuales aporta beneficios económicos y ambientales, tales como: (1) incremento de la disponibilidad de agua mediante su recuperación y reutilización, (2) reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, (3) mejora de la fertilidad de los suelos mediante la producción de fertilizantes orgánicos y (4) generación de valor económico a través de la valorización de subproductos (Mwizerwa et al., 2024; Hernández-Chover et al., 2023). Finalmente, la recuperación de energía y materiales permite mantener los recursos en circulación durante

más tiempo, mejorando la eficiencia global de los procesos y transformando lo que antes era considerado un desecho en un insumo vital para nuevos ciclos productivos (Zając y Avdiushchenko, 2020; Ghimire et al., 2021).

En la perspectiva futura, la transformación de las aguas residuales se orienta hacia sistemas cada vez más inteligentes y sostenibles. El desarrollo de tratamientos descentralizados inteligentes, basados en el uso de Inteligencia Artificial (IA), Internet de las Cosas (IoT) y análisis de datos en tiempo real, permitirá optimizar la operación de plantas de tratamiento, anticipar fallos, maximizar la recuperación de recursos y reducir el consumo energético (Kehrein et al., 2020). Simultáneamente, el concepto de economía circular hídrica en ciudades inteligentes impulsa un modelo donde el agua regenerada se integra plenamente en la estructura urbana, abasteciendo múltiples usos antes de retornar al ambiente, fortaleciendo así la resiliencia hídrica frente al cambio climático (Daigger, 2009).

Hacia 2050, se proyecta el avance hacia sistemas de "descarga cero", donde las aguas residuales son completamente aprovechadas mediante procesos de regeneración avanzada, y el surgimiento del concepto de agua de cuarta generación, caracterizada por su alta eficiencia energética, recuperación integrada de nutrientes y adaptabilidad a usos múltiples (Olsson, 2012). Estas tendencias no solo redefinirán la gestión del agua, sino que transformarán a las aguas residuales en un motor estratégico para la sostenibilidad urbana y la transición hacia un modelo económico y ambiental verdaderamente regenerativo.

Aguas residuales en México: una mirada desde la sostenibilidad y la recuperación de recursos

En México, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) reporta que existen 2 642 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el país. Sin embargo, menos del 60% de ellas se encuentran actualmente en operación, y la mayoría utiliza procesos convencionales como lodos activados, lagunas de estabilización y filtros biológicos, como se muestra en la figura 16.1 (Conagua, 2022). A pesar de estos esfuerzos, el panorama es preocupante: según Nuñez-García et al. (2023), una gran parte de estas plantas están abando-

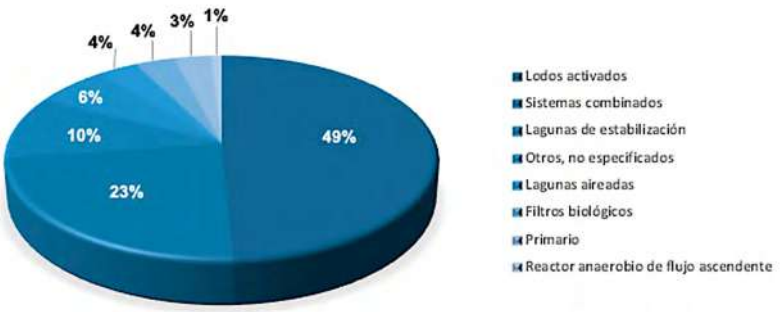
nadas o funcionan en condiciones muy precarias, principalmente por los elevados costos de mantenimiento, energía y operación. Esta situación refleja la urgente necesidad de modernizar y fortalecer la infraestructura de tratamiento de aguas en México.

Aunque los sistemas aerobios, como los lodos activados, han sido durante décadas la opción más utilizada para el tratamiento de aguas residuales, su alta demanda de energía, principalmente para la aireación, plantea importantes desafíos de sostenibilidad. En contraste, los procesos anaerobios ofrecen una alternativa más eficiente desde el punto de vista energético, ya que no requieren oxígeno y, además, generan biogás como subproducto, una fuente de energía renovable. Esta capacidad de tratar aguas residuales con un menor consumo energético y de contribuir a la recuperación de recursos posiciona a los sistemas anaerobios como piezas clave en la transición hacia un tratamiento de aguas más sostenible y circular.

Los procesos anaerobios aún no son una opción común para el tratamiento del agua residual; su uso se ha concentrado principalmente en la línea de tratamiento de lodos. De hecho, solo alrededor del 1% de las plantas de tratamiento opera con sistemas anaerobios, utilizando reactores de flujo ascendente como tecnología principal en la etapa secundaria (Sánchez-Tovar, 2023). A pesar del potencial que tienen estos sistemas, particularmente por la generación de biogás, son pocas las plantas que cuentan con la infraestructura adecuada para aprovechar esta energía, ya sea en forma de calor o para producir electricidad mediante cogeneración. Esto representa una oportunidad desaprovechada en la transición hacia un modelo de tratamiento más sostenible y autosuficiente.

Los procesos anaerobios para el tratamiento de aguas residuales no se encuentran dentro de los más comunes para la línea de agua residual, sino que son empleados principalmente en la línea de tratamiento de lodos. En la figura 16.1 se puede observar que apenas el 1% de las PTAR operan bajo el esquema de tratamiento anaerobio, por medio de reactores anaerobios de flujo ascendente, como principal tratamiento secundario del agua residual (Sánchez-Tovar, 2023). Sin embargo, pocos son los sistemas anaerobios que poseen la infraestructura necesaria para el aprovechamiento del biogás que se genera, ya sea para la producción de calor y/o de energía eléctrica por medio de cogeneradores.

Figura 16.1. *Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales*



Fuente: elaboración propia con base en datos de Conagua (2022).

En los últimos años, han comenzado a incorporarse tecnologías innovadoras, especialmente en la etapa de tratamiento secundario, con el objetivo de ir más allá de solo limpiar el agua. Estas nuevas soluciones buscan recuperar nutrientes y aprovechar los subproductos del tratamiento, por ejemplo, para la producción de composta o la mejora de suelos (Nuñez-García et al., 2023). La idea es transformar las plantas de tratamiento de aguas residuales en verdaderas plantas de proceso: lugares donde, además de obtener un efluente de buena calidad, también se generen recursos valiosos que contribuyan a hacer más rentable y sostenible su operación.

Tecnologías de tratamiento de las aguas residuales

A nivel mundial, el tratamiento de aguas residuales se ha vuelto clave para lograr un desarrollo más justo y sostenible, especialmente en lo relacionado con el acceso al agua limpia. Sin embargo, mientras algunos países ya han avanzado en esta tarea, en muchas regiones aún se descarga la mayor parte de las aguas residuales sin tratar, lo que pone en riesgo tanto la salud de las personas como la de los ecosistemas.

En México, el reto también es grande. Aunque se han construido numerosas plantas de tratamiento, solo un poco más de la mitad del agua residual recibe el tratamiento adecuado. La situación es particularmente crí-

tica en zonas rurales, donde el acceso a estos servicios es muy limitado. Además, muchas instalaciones existentes necesitan ser modernizadas, ya que operan con tecnología obsoleta o sin el mantenimiento adecuado. A pesar de estos desafíos, el país tiene una gran oportunidad: transformar el tratamiento de aguas en una estrategia de sostenibilidad. Más allá de limpiar el agua, hoy se busca también recuperar energía, nutrientes y otros recursos valiosos. Así, el tratamiento de aguas residuales deja de ser solo una obligación ambiental, y se convierte en una herramienta poderosa para cuidar nuestro futuro y el del planeta.

Para responder a estos desafíos y garantizar una gestión efectiva de las aguas residuales, se ha desarrollado una secuencia estructurada de procesos que permiten eliminar distintos tipos de contaminantes en función de su naturaleza y complejidad. Esta secuencia, adoptada en el ámbito internacional y nacional, constituye la base del diseño y operación de las plantas de tratamiento modernas. A continuación, se describen las principales etapas que conforman este proceso integral o tren de tratamiento (Zagklis y Bampos, 2022; Akbar et al., 2023).

Tratamiento primario: emplea principalmente procesos físicos y químicos para eliminar sólidos gruesos, suspendidos, así como grasas y aceites.

Tratamiento secundario: se basa en tecnologías biológicas que utilizan microorganismos para degradar la materia orgánica disuelta.

Tratamiento terciario: incorpora procesos físicos, químicos y biológicos avanzados para eliminar nutrientes, carga microbiana patógena y contaminantes persistentes que no fueron eliminados en las etapas anteriores.

En los últimos diez años, se ha puesto especial atención en el desarrollo de procesos de oxidación avanzada (POA) para el tratamiento de aguas residuales. Estos métodos buscan eliminar contaminantes difíciles de degradar, que suelen resistirse a los tratamientos convencionales. Entre ellos se encuentran tecnologías como la oxidación electroquímica, el proceso Fenton, el foto-Fenton, la electrocoagulación, entre otros. El objetivo principal es claro: lograr una limpieza más profunda del agua para que pueda ser reutilizada de forma segura, cuidando así tanto la salud pública como el medio ambiente (Lucas et al., 2021; Ugrina y Milojković, 2024).

Para comprender mejor cómo se estructura el tratamiento de aguas residuales, es útil conocer las principales técnicas y métodos utilizados en

cada etapa. A continuación, en la tabla 16.1, se resumen los procesos más representativos, desde los tratamientos primarios hasta las tecnologías avanzadas, que permiten no solo la degradación de contaminantes convencionales, sino también la degradación de compuestos persistentes y la recuperación de recursos.

Tabla 16.1. *Técnicas y métodos de tratamiento de aguas residuales*

Tratamiento	***Técnica y métodos***
Primario	Filtración, sedimentación, coagulación-floculación.
Secundario	*Aerobios:* lodos activados, filtros percoladores, MBBR, MBR. *Anaerobios:* filtros biológicos, UASB, EGSB. *Sistemas combinados:* Aerobios/Anaerobios
Terciario	Cloración, irradiación ultravioleta, filtración por membranas, humedales construidos, cultivo de microalgas, ozonización.
Avanzados	Oxidación electroquímica, coagulación combinada con radiación ultra violeta y ozono (UV/O_3), sistemas de radiación y peróxido (UV/H_2O_2), catálisis heterogénea.

Fuente: elaboración propia.

Es importante comprender que no existe una única tecnología para tratar las aguas residuales y que, dependiendo de la calidad final requerida, se pueden adoptar diferentes configuraciones de tratamiento.

Reutilización de las aguas residuales

En lugar de desechar las aguas tratadas directamente en cuerpos de agua o sistemas de alcantarillado, se pueden convertir en una valiosa fuente alternativa: un recurso hídrico no convencional. Su reutilización abarca una amplia variedad de usos, desde el riego agrícola y actividades industriales, hasta aplicaciones urbanas, recreativas e incluso, en algunos casos, el consumo humano (Guerra-Rodríguez et al., 2020). Para ello, han surgido las llamadas plantas de regeneración, que incorporan tratamientos terciarios avanzados. Estas plantas utilizan distintos procesos y tecnologías, adaptados a los niveles de calidad del agua requeridos por la normativa vigente, dependiendo del destino final y del país en el que se implementen (Salgot y Folch, 2018). Así, la recuperación de aguas residuales no solo representa una estrategia para enfrentar la escasez hídrica, sino también una oportu-

nidad para aprovechar un recurso que, hasta hace poco, simplemente se consideraba un desecho.

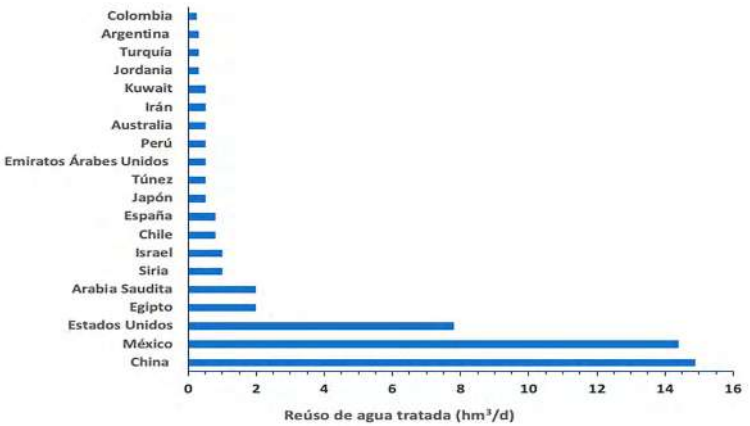
La reutilización de aguas residuales tratadas puede darse de forma indirecta, cuando el efluente se vierte a cuerpos de agua antes de ser usado nuevamente o de forma directa, cuando se reutiliza sin pasar por el ambiente natural (Kazner et al., 2012; Guerra-Rodríguez et al., 2020). Esta práctica ha cobrado especial importancia en países que enfrentan estrés hídrico, como México, que en 2018 se posicionó como el segundo mayor reutilizador de aguas residuales a nivel mundial (Guerra-Rodríguez et al., 2020) (figura 16.2). Con aproximadamente 14 hm^3/día, México supera ampliamente a países como Estados Unidos, Egipto, Arabia Saudita e Israel, este último reconocido históricamente como referente en gestión hídrica eficiente. Este alto volumen de reúso refleja la importancia que ha cobrado esta práctica en el país, especialmente frente al estrés hídrico que afecta a amplias regiones del territorio nacional. Sin embargo, como se ha señalado en estudios recientes, gran parte de esta agua reutilizada no recibe tratamientos terciarios o avanzados, lo que representa un área crítica a mejorar en términos de salud pública y seguridad ambiental.

Diversos estudios han alertado sobre la presencia de contaminantes persistentes en estos efluentes, como patógenos, microcontaminantes, genes de resistencia a antibióticos, productos farmacéuticos y subproductos de desinfección (Kulkarni et al., 2018; Čelić et al., 2019). Por ello, avanzar hacia un reúso seguro requiere no solo normativas más estrictas, sino también tecnologías que garanticen una calidad adecuada del agua para cada tipo de uso.

La posición destacada de México en la gráfica no necesariamente implica liderazgo tecnológico, sino más bien una necesidad estructural de recurrir al reúso frente a la escasez. Esto plantea una gran oportunidad: fortalecer la infraestructura de tratamiento y modernizar las plantas existentes, incorporando tecnologías que garanticen una calidad del agua adecuada según su uso final.

En un contexto donde la sostenibilidad se ha convertido en una prioridad para todos los sectores, incluido el tratamiento de aguas residuales, aplicar tratamientos adicionales muchas veces no resulta viable debido a su alto costo en relación con los beneficios obtenidos. Ante este reto, la

Figura 16.2. *Reutilización global de aguas residuales tratadas*



Fuente: elaboración propia con base en datos de Guerra-Rodríguez et al. (2020).

atención se ha enfocado en valorizar el recurso en lugar de desecharlo. Hoy en día, se busca aprovechar las aguas residuales no solo como un desecho a tratar, sino como una fuente útil para recuperar energía —a través de la producción de biogás— y generar productos como fertilizantes. Además, las tecnologías emergentes están explorando la recuperación de metales y nutrientes, lo que abre nuevas oportunidades para hacer más eficientes y sostenibles estos sistemas. Esta visión ha comenzado a transformar las plantas de tratamiento en verdaderos centros de recuperación de recursos, capaces de ofrecer productos con valor agregado (Ghimire et al., 2021; Hernández-Chover et al., 2023).

Considerando que en la actualidad existe una creciente preocupación por garantizar una mayor sostenibilidad de los procesos industriales, incluido el sector del tratamiento de aguas residuales, tratamientos adicionales, son considerados no tan viables, por el costo-beneficio. Bajo este contexto, lo que se ha buscado es la valorización de las aguas residuales, a través de la recuperación de energía, mediante la producción de biogás, fertilizantes, mientras que tecnologías emergentes enfocadas en la recuperación de metales y nutrientes buscan mejorar la eficiencia y sostenibilidad. Esto ha llevado a redefinir las plantas de tratamiento como centros de recuperación de recursos con productos de valor agregado (Ghimire et al., 2021; Hernández-Chover et al., 2023).

Tendencias emergentes en el tratamiento de aguas residuales: digitalización y descentralización

En México, el tratamiento de aguas residuales sigue enfrentando retos importantes: muchas plantas operan por debajo de su capacidad o carecen del mantenimiento necesario, especialmente en zonas rurales y urbanas marginadas. Frente a esta realidad, están surgiendo nuevas alternativas que integran tecnologías digitales para hacer más eficiente, accesible y sostenible el tratamiento del agua.

Una de las principales tendencias emergentes es la implementación de sistemas descentralizados inteligentes, que permiten tratar las aguas residuales cerca del punto donde se generan. Esto no solo reduce los costos asociados al transporte del agua, sino que también facilita su reúso local, una práctica cada vez más relevante ante el estrés hídrico que vive el país (Guerra-Rodríguez et al., 2020). Estos sistemas se apoyan en tecnologías como el internet de las cosas, que permite monitorear parámetros clave en tiempo real; la Inteligencia Artificial, que ayuda a optimizar procesos y anticipar fallos; y el Big Data, que recopila y analiza grandes volúmenes de datos para una mejor toma de decisiones (Ghimire et al., 2021).

Este enfoque no solo representa una mejora operativa, sino también un cambio de paradigma: pasar de ver el agua residual como un desecho a considerarla una fuente de recursos. Así, la digitalización y descentralización abren la puerta a un tratamiento más resiliente, autónomo y adaptado a las necesidades locales (Hernández-Chover et al., 2023).

Casos exitosos en la recuperación y aprovechamiento de biogás

En México ha crecido el interés por aprovechar al máximo los recursos contenidos en las aguas residuales, impulsando así una visión más sostenible del tratamiento. Un ejemplo claro de esta tendencia es la incorporación de sistemas anaerobios en plantas de tratamiento, los cuales permiten generar biogás a partir de los procesos realizados tanto en la línea de agua

como en la línea de lodos de purga. Uno de los casos más destacados es el de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Metropolitana San Jerónimo, ubicada en San Francisco del Rincón, Guanajuato. Esta planta inició operaciones en 2013 y hoy es un referente nacional en economía circular. Su sistema incluye un digestor anaerobio que transforma los lodos en biogás, el cual se utiliza para producir energía eléctrica mediante un equipo de cogeneración instalado en 2015 (SITRATA, 2019). Gracias a esta tecnología, cerca del 10% de la energía que consume la PTAR se genera internamente, lo que reduce costos operativos y la dependencia de fuentes externas de energía.

Otro caso emblemático en México es la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco, considerada la más grande del país. Fue diseñada específicamente para tratar las aguas residuales generadas en el Valle de México, una de las regiones más pobladas. Con un caudal de diseño de 35 m^3/s (Núñez-García et al., 2023). Esta PTAR no solo destaca por su capacidad hidráulica, sino también por su apuesta por la generación de energía limpia. La PTAR cuenta con una capacidad autorizada de cogeneración de 32.6 MW, y se estimó una producción anual de 200.6 millones de Wh (GIZ México, 2018). Gracias a su sistema de digestión anaerobia y cogeneración, en su mejor momento logró cubrir hasta el 62% de su propia demanda energética (GIZ México, 2018), un logro significativo en términos de eficiencia y sostenibilidad. Sin embargo, el proyecto no ha estado exento de desafíos, por ejemplo, conflictos sociales vinculados al manejo del agua residual (García-Salazar, 2019), así como el rechazo al uso agrícola de los lodos estabilizados mediante digestión anaerobia (Hayashida Carrillo et al., 2023) han limitado el aprovechamiento completo de su potencial energético. A pesar de ello, la PTAR sigue siendo un referente técnico y una muestra del potencial que existe en México para combinar tratamiento de aguas y generación de energía en un mismo sistema. Este tipo de experiencias demuestra que la valorización de las aguas residuales no solo es posible, sino que también representa una oportunidad real para construir sistemas de tratamiento más autosuficientes, eficientes y alineados con los principios de sostenibilidad.

Cabe señalar que, de acuerdo con datos del INEGI, en México solo existen 15 PTAR que utilizan digestión anaerobia de lodos activados de purga

para producir energía eléctrica a partir del biogás (García-Castillo et al., 2024). Entre ellas se encuentran la PTAR Villa de Álvarez (Colima), la PTAR Principal (Coahuila), la PTAR León (Guanajuato), así como las plantas Agua Prieta y El Ahogado (Jalisco) y la PTAR San Pedro Mártir (Querétaro) (Sandoval Yoval et al., 2017). A pesar de que este dato refleja avances importantes en el aprovechamiento de los recursos contenidos en las aguas residuales, la información pública disponible aún es limitada: no se reportan detalles sobre la capacidad instalada de los sistemas de cogeneración ni sobre su producción de electricidad actual. Esto dificulta evaluar el verdadero impacto de estas iniciativas en términos de eficiencia energética y sostenibilidad, y subraya la necesidad de mayor transparencia y monitoreo en los proyectos de recuperación de energía en México.

Soluciones tecnologías para la recuperación de nutrientes

Hoy en día, las prácticas de economía circular aplicadas en las PTAR van más allá de simplemente eliminar contaminantes. El enfoque actual busca recuperar los nutrientes presentes en el agua residual o tratada, especialmente por su alto valor para actividades como la agricultura. Uno de los nutrientes más importantes es el fósforo, un elemento esencial para la vida, pero no renovable. Es clave para el crecimiento de las plantas y participa en numerosas funciones metabólicas en los organismos vivos (Cornel y Schaum, 2009). Su recuperación no solo es estratégica, sino necesaria para garantizar la seguridad alimentaria a largo plazo. Por otro lado, el nitrógeno también juega un papel fundamental. Aunque abundante, su forma reactiva suele liberarse de forma descontrolada al ambiente, tanto por el uso excesivo de fertilizantes sintéticos como por su presencia en detergentes y desechos humanos, como la orina (Sengupta et al., 2015). Por lo que, recuperar estos nutrientes ayuda a reducir la contaminación ambiental y, al mismo tiempo, permite reutilizarlo de forma más eficiente en actividades agrícolas y otras aplicaciones.

La recuperación de nitrógeno y fósforo a partir de aguas residuales es una estrategia cada vez más relevante en el contexto de la sostenibilidad.

Por el ejemplo el nitrógeno y el fósforo se puede precipitar químicamente del agua residual en forma de estruvita, que puede emplearse como fertilizante (Le Corre et al., 2009). Se pueden emplear materiales como zeolitas, resinas o biochar modificados para capturar iones de amonio (NH_4^+) o fosfato (PO_4^{3-}), los cuales se pueden emplear como enmiendas agrícolas (Wu et al., 2016). También se pueden emplear procesos electroquímicos (Du et al., 2023), y la asimilación biológica, que aprovecha la capacidad de ciertos microorganismos para incorporarlos en su metabolismo (Han y Zhou, 2022). Los procesos electroquímicos, en particular, han mostrado un gran potencial para extraer estos compuestos de forma eficiente, y se están convirtiendo en una alternativa atractiva para modernizar las plantas de tratamiento. En la tabla 16.2 se describen algunas de las tecnologías más representativas empleadas para este fin.

Tabla 16.2. *Procesos electroquímicos para recuperación de nutrientes en aguas residuales*

Nitrógeno	***Fósforo***
Extracción por aireación	Precipitación química y cristalización
Extracción por membranas	Precipitación inducida electroquímicamente
Resinas de intercambio iónico	Adsorción e intercambio iónico
Reactores osmóticos de membrana	
Extracción térmica	
Concentración en membrana	

Fuente: adaptado de Du et al. (2023).

Por otro lado, la asimilación biológica es otra vía importante para recuperar nutrientes del agua residual. Este enfoque utiliza la capacidad natural de los microorganismos para capturar y transformar compuestos como el nitrógeno y el fósforo. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran los reactores de membrana aireada, los sistemas de biopelícula, los sistemas bioelectroquímicos y los procesos de remoción biológica avanzada de fósforo (Du et al., 2023). Recientemente, también se ha resaltado el potencial de los microorganismos fotosintéticos y heterótrofos para asimilar nitrógeno de manera sinérgica. A través del análisis de los flujos de conversión en las redes del ciclo biogeoquímico del nitrógeno, se ha identificado esta estrategia como una opción prometedora no solo para eliminar nitrógeno de las aguas residuales, sino también para recuperarlo

como recurso útil (Han y Zhou, 2022). Este tipo de enfoques integrados están ayudando a transformar el tratamiento de aguas en una herramienta más alineada con la sostenibilidad y la economía circular.

Es importante destacar que la mayoría de los procesos avanzados para la recuperación de nutrientes a partir de aguas residuales, descritos en la literatura científica, se encuentran aún en etapas de laboratorio o escala piloto. Esto se debe a que muchos de estos métodos enfrentan limitaciones significativas, como el alto consumo energético, la dependencia de reactivos químicos, y los problemas generados por interferencias de otros iones o por competencia microbiana durante el proceso. Por esta razón, su aplicación a gran escala en plantas de tratamiento reales todavía está en una fase de evaluación. En otras palabras, el escalamiento industrial de estas tecnologías sigue siendo un reto, ya que requiere estudios más profundos sobre su viabilidad técnica y factibilidad económica. Aun así, representan un camino prometedor hacia un tratamiento de aguas más eficiente, sostenible y alineado con los principios de la economía circular.

Conclusiones

La transición hacia un modelo de economía circular en el tratamiento de aguas residuales es mucho más que una tendencia: es una oportunidad estratégica para avanzar en la sostenibilidad ambiental, energética y económica de México. Aunque ya se han logrado avances importantes como el reúso de agua tratada y la recuperación de biogás en algunas plantas, todavía enfrentamos desafíos considerables. Muchas instalaciones necesitan modernizarse, el uso de tecnologías avanzadas sigue siendo limitado, y gran parte del potencial contenido en el agua residual aún no se aprovecha por completo. Para que este cambio de enfoque sea una realidad, es crucial invertir en infraestructura más eficiente, apostar por sistemas descentralizados e inteligentes, y dar impulso a tecnologías emergentes como la digestión anaerobia y la recuperación de nutrientes. Pero no basta con la tecnología: también se necesita una gobernanza sólida que promueva el reúso seguro del agua y fomente la innovación. Si logramos alinear estos esfuerzos, las

plantas de tratamiento pueden transformarse en centros de recuperación de recursos, clave para enfrentar la crisis hídrica y construir un futuro más sostenible para todos.

Referencias

Akbar, M. Yaqoob, A., Ahmad, I. y Ahmad, A. (2023). Wastewater treatment: An overview. En A. Ahmad, I. Ahmad, ... y S. Tabassum (Eds.), *Sodium alginate-based nanomaterials for wastewater treatment* (pp. 19-34). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823551-5.00006-9

Batstone, D. J., Hülsen, T., Pérez, J. y Keller, J. (2015). Downstream impacts of wastewater treatment technology selection: Life cycle assessment of high-rate anaerobic treatment with nutrient recovery. *Water Research, 77,* 32-43.

Čelić, M., Gros, M., Farré, M., Barceló, D., Petrović, M. (2019). Pharmaceuticals as chemical markers of wastewater contamination in the vulnerable area of the Ebro Delta (Spain). *Science of the Total Environment, 652,* 952-963. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.290

Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2022). *Estadísticas del agua en México 2021*. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones

Cornel, P. y Schaum, C. (2009). Phosphorus recovery from wastewater: Needs, technologies and costs. *Water Science and Technology, 59*(6), 1069-1076. https://doi.org/10.2166/wst.2009.045

Daigger, G. T. (2009). Evolving urban water and residuals management paradigms: Water reclamation and reuse, decentralization, and resource recovery. *Water Environment Research, 81*(8), 809-823. https://doi.org/10.2175/106143009X425898

Du, J., Waite, T. D., Feng, J., Lei, Y. y Tang, W. (2023). Coupled electrochemical methods for nitrogen and phosphorus recovery from wastewater: A review. *Environmental Chemistry Letters, 21*(2), 885-909. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01561-x

García-Castillo, C. C., Guerrero García Rojas, H. R. y Maldonado Villalpando, E. (2024). Una revisión sobre las posibilidades de autosuficiencia energética y reutilización de agua en las plantas de tratamiento de agua residual en México. *Ciencia Nicolaita,* (91), 171-180. https://doi.org/10.35830/cn.vi91.760

García-Salazar, E. 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). https://doi.org/10.24836/es.v29i54.741

Ghimire, U., Sarpong, G. A. y Gude, V. G. (2021). Transitioning to circular economy through resource recovery from wastewater: Prospects and challenges. *Environmental Research, 201,* 111606.

Ghimire, U., Sarpong, G. y Gude, V. G. (2021). Transitioning wastewater treatment

plants toward circular economy and energy sustainability. *ACS Omega, 6*(18), 11794-11803. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05827

GIZ México. (2018). *Proyectos de aprovechamiento energético a partir de residuos urbanos en México: Plantas de producción de energía en hornos cementeros, biodigestores, rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales.*

Guerra-Rodríguez, S., Oulego, P., Rodríguez, E., Singh, D. N. y Rodríguez-Chueca, J. (2020). Towards the implementation of circular economy in the wastewater sector: Challenges and opportunities. *Water, 12*(5), 1431. https://doi.org/10.3390/w12051431

Guerra-Rodríguez, S., Rodríguez, E. y Gómez-Lavín, S. (2020). Wastewater reuse: An alternative to face water scarcity. *Journal of Environmental Management, 276,* 111310.

Han, F. y Zhou, W. (2022). Nitrogen recovery from wastewater by microbial assimilation: A review. *Bioresource Technology, 363,* 127933. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127933

Hayashida Carrillo, A. H., Rolón Sánchez, J. E. y Onofre Villalba, M. F. (2023). *Estudio de caso: Uso agrícola de biosólidos en planta de tratamiento de aguas residuales, Atotonilco de Tula.* Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. https://hdl.handle.net/11324/23088

Hernández-Chover, V., Bellver-Domingo, Á. y Escobar-Barragán, J. (2023). Circular economy and resource recovery in wastewater treatment plants. *Sustainable Cities and Society, 88,* 104263.

Hernández-Chover, V., Castellet-Viciano, L., Fuentes, R. y Hernández-Sancho, F. (2023). Circular economy and efficiency to ensure the sustainability in the wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production, 384,* 135563. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135563

Kazner, Ch., Wintgens, Th. y Dillon, P. (2012). *Water reclamation technologies for safe managed aquifer recharge* (vol. 11). IWA. https://doi.org/10.2166/9781780400648

Kehrein, P., van Loosdrecht, M. C. M., Osseweijer, P., Garfí, M., Dewulf, J. y Posada, J. (2020). A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants-market supply potentials, technologies and bottlenecks. *Environmental Science: Water Research & Technology, 6*(4), 877-910. https://doi.org/10.1039/c9ew00905a

Kulkarni, P., Olson, N. D., Paulson, J. N., Pop, M., Maddox, C., Claye, E., Goldstein, R. E. R., Sharma, M., Gibbs, S., Mongodin, E. F. et al. (2018). Conventional wastewater treatment and reuse site practices modify bacterial community structure but do not eliminate some opportunistic pathogens in reclaimed water. *Science of the Total Environment, 639,* 1126-1137. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.178

Le Corre, K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P. y Parsons, S.A. (2009). Phosphorus recovery from wastewater by struvite crystallization: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 39*(6), 433-477. https://doi.org/10.1080/10643380701640573

Lucas, M. S., Peres, J. A. y Li Puma, G. (2021). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment. *Water, 13*(9), 1309. https://doi.org/10.3390/w13091309

Mwizerwa, I. T., Husein, M., Houssini, K., Praise, S. y Kateita, J. (2024). Wastewater treatment, recycling, and reuse-past, present, and future: A circular economy perspec-

tive. En *Innovative and hybrid technologies for wastewater treatment and recycling* (pp. 326-345). CRC. https://doi.org/10.1201/9781003454199-15

Nuñez-García, U., Navarro-Gómez, H. I., del Refugio González-Sandoval, M. y Flores-Badillo, J. (2023). Tratamiento biológico de aguas residuales con perspectiva de economía circular. *Pädi: Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 11,* 112-122. https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial3.11486

Olsson, G. (2012). *Water and energy: Threats and opportunities.* IWA. https://doi.org/10.2166/9781780400693

Salgot, M. y Folch, M. (2018). Tratamento de águas residuais e reutilização de água. *Current Opinion in Environmental Science & Health, 2,* 64-74. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005

Sánchez-Tovar, S. A. (2023). Sistema combinado anaerobio-humedal de tratamiento de aguas residuales para comunidades de Michoacán, México. *Ambiens Techné et Scientia México, 11*(1), 43-70.

Sandoval Yoval, L., Mantilla Morales, G., Ramírez Camperos, E., Gasca Álvarez, S., Navarro Franco, J., Hernández Cruz, N., García Rojas, J. L., Esquivel Sotelo, A. y Calderón Mólgora, C. G. (2017*). Potencial de generación de energía eléctrica a partir de plantas de tratamiento de lodos activados* [Ponencia]. XII Congreso Regional para Norteamérica y el Caribe.

Sengupta, S., Nawaz, T. y Beaudry, J. (2015). Nitrogen and phosphorus recovery from wastewater. *Current Pollution Reports, 1,* 155-166. https://doi.org/10.1007/s40726-015-0013-1

Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinas, B. J. y Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature, 452*(7185), 301-310. https://doi.org/10.1038/nature06599

Sistema Intermunicipal para los Servicios de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales para los Municipios del Rincón (Sitrata). (2019). *Informe de la gestión: PTAR metropolitana San Jerónimo 2016-2019*.

Ugrina, M. y Milojković, J. (2024). Advances in wastewater treatment, 2024. *Energies, 17*(6), 1400. https://doi.org/10.3390/en17061400

United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). (2017). *The United Nations world water development report 2017: Wastewater, the untapped resource.* UNESCO.

Verstraete, W., Van de Caveye, P. y Diamantis, V. (2009). Maximum use of resources present in domestic "used water". *Bioresource Technology, 100*(23), 5537-5545. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.047

Wu, L., Zhang, J. y Li, B. (2016). Zeolite-based materials for phosphate and ammonium removal from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management, 187,* 90-104.

Zagklis, D. P. y Bampos, G. (2022). Tertiary wastewater treatment technologies: A review of technical, economic, and life cycle aspects. *Processes, 10*(11), 2304. https://doi.org/10.3390/pr10112304

Zając, P. y Avdiushchenko, A. (2020). The impact of converting waste into resources on the regional economy, evidence from Poland. *Ecological Modelling, 437,* 109299. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109299

17. Estrategias de gobernanza para el estrés hídrico: Una revisión de enfoques y desafíos*

Diego Domínguez-Solís[1]
María Concepción Martínez-Rodríguez[2]
Andrea Lizeth Pérez-Martínez[3]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.17

Resumen

Los modelos de gobernanza son marcos que definen cómo se gestionan los recursos, como el agua, en una sociedad, y son clave para abordar el estrés hídrico, que ocurre cuando la demanda de agua supera su disponibilidad, afectando tanto a los ecosistemas como a las comunidades. Este capítulo tiene como objetivo analizar diferentes enfoques de gobernanza de nivel local, e internacional, para neutralizar el problema del estrés hídrico, a través de una metodología de tipo cualitativa donde se recopilan diferentes artículos de la base de datos Web of Science y Scopus. Se recolectaron 118 artículos, el mapa de coocurrencia y el de densidad permite identificar palabras clave como, gobernanza y estrés hídrico. Lo analizado en el trabajo expone los modelos de gobernanza que se han adoptado para combatir el estrés hídrico, resultante del crecimiento demográfico desacelerado, el calentamiento global y la sobreexplotación de los acuíferos entre otros, así como el papel de los actores en materia de agua involucrados para llevar a cabo una gobernanza eficaz, a su vez se expone como estos pueden representar una limitación para estos modelos. En conclusión, se presenta a través de esta investigación como es que la adopción, mejoría y cambios de estrategias de modelos de gobernanza del agua ayudaría a combatir el estrés

* Derivado del proyecto de Investigación SIP 20251143 del Instituto Politécnico Nacional.

[1] Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8402-5157

[2] Doctora en Política Pública. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3094-5411

[3] Estudiante de Ingeniería Ambiental en el Instituto Politécnico Nacional, México.

hídrico partiendo desde problemáticas sociales y ambientales que en la actualidad mantienen en riesgo la sostenibilidad.

Palabras clave: *gobernanza del agua, cambios, modelos de gobernanza, sustentabilidad y estrés hídrico.*

Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo sostenible, desempeñando un papel crucial en los ecosistemas, la seguridad alimentaria, la generación de energía y el bienestar humano (Pacheco y Vega, 2020), sin embargo, en las últimas décadas, el planeta enfrenta una creciente crisis hídrica en la que la demanda de agua supera la disponibilidad y calidad del recurso en un periodo determinado, esto se ha intensificado a raíz del cambio climático, el crecimiento demográfico y las crecientes demandas de los sectores productivos (Boipelo et al., 2019). Según Steflova et al. (2018) la contaminación de fuentes hídricas debido al vertido de aguas residuales sin tratamiento y la deficiente gestión del recurso agravan aún más este escenario, poniendo en riesgo tanto la sostenibilidad de los ecosistemas como el acceso equitativo al agua.

Diversos estudios han documentado el aumento de zonas afectadas por escasez hídrica, tanto en regiones áridas como en aquellas con abundantes reservas, debido a la ineficiencia en la distribución y gestión del recurso (UNESCO, 2020; WWAP, 2021; Quentin et al., 2019). En este contexto, la gobernanza del agua ha emergido como un enfoque fundamental para enfrentar la crisis desde las diferentes perspectivas (Julio et al., 2021) la gobernanza hídrica va más allá de una gestión técnica del recurso; implica la participación de múltiples actores de acuerdo con (Lieberherr y Ingol, 2019) de los cuales destacan los gobiernos, comunidades, sector privado, organizaciones internacionales, en la toma de decisiones, el diseño de políticas públicas o la mejora de las mismas (Tomai et al., 2024) y la implementación de mecanismos que aseguren el uso equitativo y sostenible del agua (Quentin et al., 2019).

Existen diferentes posturas respecto a los modelos más eficaces de gobernanza del agua. Mientras algunas propuestas priorizan enfoques tecnificados y centralizados, orientados a la eficiencia operativa, otras abogan por modelos más participativos e inclusivos, que integran conocimientos locales, participación comunitaria y cooperación transfronteriza (OECD, 2015; Pahl-Wostl, 2017). Según Bhuwan y Cristóbal (2019), esta diversidad de enfoques refleja la posibilidad de aplicar estrategias diferenciadas y complementarias al alcance de la sociedad, capaces de responder a los desafíos específicos del estrés hídrico en distintas regiones, independientemente de su situación socioeconómica. Estas soluciones implican desde la reutilización de aguas residuales, sistemas de captación (Marketa et al., 2018), hasta la desalinización en países más desarrollados (Wang et al., 2013). Estas tensiones reflejan la complejidad del desafío y la necesidad de enfoques interdisciplinarios que articulen sostenibilidad, resiliencia y justicia hídrica.

Este trabajo tiene como objetivo analizar la problemática del estrés hídrico desde un enfoque centrado en la gobernanza del agua como herramienta clave para una gestión eficiente, equitativa y sostenible del recurso, esta revisión interdisciplinaria, busca aportar la recopilación de estrategias, políticas y mecanismos de participación que permiten reducir la vulnerabilidad frente a la crisis hídrica y avanzar hacia un modelo de seguridad hídrica a largo plazo.

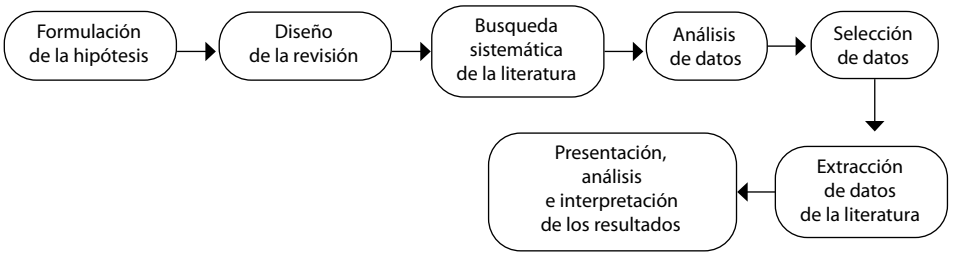
Metodología

Para garantizar una metodología bien definida y rigurosa que sustente la validez de este estudio, se presenta a continuación el proceso de investigación seguido.

Criterios de inclusión y exclusión

Las bases de datos empleadas para la revisión bibliográfica fueron Scopus y Web of Science, ya que ambas proporcionan literatura científica completa

Figura 17.1. *Metodología aplicada*



Fuente: elaboración propia.

y de alta calidad, adecuada para revisiones sistemáticas. Se utilizaron las siguientes palabras clave: *Water stress y governance.* En la etapa inicial, se aplicaron estos filtros iniciales, el total de artículos identificados fue de 118, de los cuales 50 provenían de Web of Science y 68 de Scopus.

Primera etapa de selección: se descartaron 16 artículos duplicados presentes en ambas bases de datos.

Segunda etapa de selección: posteriormente, se excluyeron artículos que no abordaban directamente la temática de interés, comenzando con una evaluación por título (17 artículos descartados), seguida de una revisión por resumen o *abstract* (7 artículos eliminados).

Tercera etapa de selección: finalmente, una lectura del texto completo (3 artículos excluidos). Como resultado de esta etapa, se seleccionaron 24 artículos de la base Scopus, en el caso de Web of Science, se descartaron 7 artículos por el título y 3 por el resumen, en el caso de Web of Science, no se excluyó ninguno por el contenido completo. Esto redujo el conjunto a 15 artículos seleccionados de esta base de datos.

Selección final: de los 118 artículos inicialmente recopilados, tras aplicar todos los criterios de selección, se eligieron 39 artículos en total para la revisión bibliográfica: 24 de Scopus y 15 de Web of Science.

Análisis de datos

Se llevó a cabo un análisis cualitativo de los 39 artículos seleccionados (Scopus: $n = 24$; Web of Science: $n = 15$), utilizando el software VOSviewer

Tabla 17.1.

Sección		*Descripción*	
Identificación		Base de datos: Scopus y Web of Science Período de búsqueda: 2009-2025 Tópicos: "Governance", "water stress"	
Selección y elegibilidad	1	Total de artículos (*n* = 168)	Artículos duplicado (*n* = 16) Otras razones (*n* = 0)
	2	Artículos elegibles (*n* = 23)	Artículos excluidos (*n* = 23)
	3	Artículos elegibles (*n* = 15)	Artículos excluidos (*n* = 10)
Inclusión		Artículos elegibles (*n* = 38)	

Fuente: elaboración propia.

versión 1.6.17. Este análisis permitió generar un mapa de coocurrencia y un mapa de densidad, los cuales reflejan las relaciones entre los términos clave más utilizados en la literatura y la fuerza de sus vínculos. Para asegurar la claridad en los resultados, se eliminaron duplicidades de palabras en sus formas singular y plural, priorizando las palabras compuestas.

Adicionalmente, mediante el uso de la base de datos Bibliometrix, se elaboró una representación gráfica de la producción científica relacionada con la gobernanza del agua y el estrés hídrico, correspondiente al período 2009-2024. Esta visualización permitió identificar tendencias de investigación, así como regiones y autores con mayor producción académica en la temática.

En una segunda etapa del análisis, se extrajo información relevante sobre los enfoques adoptados en torno a la gestión del recurso hídrico, los modelos de gobernanza, los actores involucrados, y las estrategias implementadas para enfrentar situaciones de escasez y presión sobre los recursos hídricos. Este proceso permitió identificar experiencias significativas, destacar buenas prácticas, y analizar el grado de implementación de políticas públicas en distintos contextos geográficos.

Resultados

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de los principales modelos de gobernanza del agua aplicados en diversos países, abarcando realidades de naciones desarrolladas, semidesarrolladas y en vías de desarrollo. Estas es-

trategias incluyen enfoques como la reutilización de aguas residuales, la desalinización de agua de mar, la implementación de sistemas de captación, la formulación de nuevas políticas públicas, la restructuración de marcos normativos existentes, y la asignación equitativa del recurso hídrico, entre otros.

Junto con estas estrategias, también se identificaron diversas limitaciones que afectan la gobernanza del agua, entre las que destacan el cambio climático, el crecimiento demográfico acelerado, la falta de acceso a información clara y oportuna, y la desigualdad social producto de la pobreza y la marginación en determinadas regiones. Asimismo, se evidencian desafíos vinculados a la escasa participación ciudadana y al desacuerdo frente a ciertas formas de gestión, como es el caso de la reutilización de aguas residuales, cuya aceptación puede verse limitada debido a su variabilidad en la calidad y a los riesgos percibidos para la salud pública. Asimismo, se analizó la situación actual en relación con la explotación del recurso hídrico y la eficacia en la implementación de los modelos de gobernanza, destacando sus beneficios tanto a nivel socioeconómico como en términos de gestión sostenible del agua.

La revisión también consideró los principales actores involucrados en la construcción de una gobernanza hídrica eficiente, tales como los gobiernos nacionales, locales y municipales, los marcos normativos y legislativos, así como la cooperación transfronteriza y otros mecanismos institucionales clave.

Tabla 17.2. *Síntesis de los artículos revisados*

Título del artículo	***Estrategia de gobernanza***	***Beneficios para la gestión del agua***	***Limitaciones y desafíos***
A tug of war between centralization and decentralization: the co-evolution of urban governance and water risks in Guwahati, India	Mapa de tendencias de gobernanza, exploraciones cualitativas	Infraestructura de suministro de agua para uso doméstico, seguida de la mitigación de inundaciones y el bajo interés en las opciones de tratamiento de aguas residuales o en la mejora de la calidad de los ríos urbanos.	Inundaciones, acceso limitado al agua potable, cambios de uso del suelo, y contaminación hídrica, fallas en la gobernanza y desigualdades sociales, recursos limitados

Global factors driving local water stress and global responses to local water policies in the United States	SIMPLE-G-US (Modelo Internacional Simplificado de Precios Agrícolas, Uso del Suelo y Medio Ambiente, versión en cuadrícula para Estados Unidos), políticas estadounidenses	Sostenibilidad a largo plazo y seguridad alimentaria, preservemos el área física en lugar del volumen económico.	Alto crecimiento económico, degradación de los recursos hídricos y terrestres
Legitimacy in polycentric groundwater governance: Framework conditions identified in Nebraska's Natural Resource Districts	Legitimidad de procesos sociales informales, planes de gestión integrada, infracciones por consumo excesivo, gobernanza policéntrica en aguas subterráneas y superficiales, normatividad del uso del agua subterránea	La gobernanza policéntrica proporciona un amortiguador contra la degradación de recursos, mejora de la gestión ambiental	Factores como el calor, cambios en precipitaciones, podrían exacerbar la disminución de aguas subterráneas, falta de información sobre las tasas de consumo
Water resources management and policy evaluation in Middle Eastern countries: achieving Sustainable Development Goal 6	Alianzas con Jordania, alianzas público privadas, la adopción generalizada de tecnología de desalinización, planes de gestión de recursos hídricos, como el reciclaje de aguas residuales, la captación de agua de lluvia y la reutilización del agua	Uso universal y equitativo del agua, gestión integrada de los recursos hídricos, agua limpia y saneamiento	Crecimiento demográfico, variabilidad climática, e inestabilidad política, persistencia en deficiencias políticas de saneamiento y cooperación transfronteriza, localización en zonas desérticas, aumento del calentamiento global, contaminación y recursos financieros
Identifying Regime Transitions for Water Governance in the Yellow River Basin, China	Transformación de la gobernanza del agua de una cuenca hidrológica, incorporación de un índice integrado de gobernanza del agua (IWGI), indicadores de estrés IS, indicador de propósito IP, indicador de asignaciones IA	Cuantificación más completa de los resultados de gobernanza, correcta armonización de los sistemas humanos e hídricos	Falta de información, cambio climático, regulaciones sistemáticas sobre la asignación del agua, crecientes demandas energéticas e industriales hacen que los propósitos de los servicios hídricos se desvíen
Readiness and willingness of the public to participate in integrated water management: some insights from the Levant	Implementación de las GIRH con participación de la población	Mejora de los conocimientos acerca de cómo son gestionadas cuencas de las localidades,	Poca preparación para que la población participe, desconocimiento de si la población realmente está interesada en participar, poca conciencia
China's stressed waters: Societal and environmental vulnerability in China's internal and transboundary river systems	Análisis de cuencas fluviales de china, formulación de políticas, evaluación de vulnerabilidades	Formulación de políticas para desafíos en los recursos hídricos, visión integral y comparable de la vulnerabilidad de las cuencas	Huella humana, crecimiento demográfico, reducción de precipitaciones y zonas propensas a inundaciones

Efficiency and acceptance of new water allocation rules - The case of an agricultural water users association	Promoción de prácticas de gestión del agua, equilibrara la oferta y demanda del agua, asignación del agua por hectárea, reglas de asignación	Implantación de tecnologías de ahorro de agua para regadío	Cambio climático, Presupuestos económicos,
Governing Non-Potable Water-Reuse to Alleviate Water Stress: The Case of Sabadell, Spain	Economía circular en aguas residuales, aplicación de reutilización de aguas residuales, participación de las partes interesadas	Alivio del estrés hídrico	Desafíos de gobernanza multinivel, barreras técnicas y no técnicas
Institutional Strategies for Adaptation to Water Stress in Farmer-Managed Irrigation Systems of Nepal	Medidas estructurales y operativas	Balance entre la demanda y la oferta del agua	Urbanización, migración, laboral, variabilidad y cambio climático
Addressing Urban-Rural Water Conflicts in Nagpur through Benefit Sharing	Proyecto Pench (Hidroeléctrica)	N/A	Disminución en la disponibilidad del agua, urbanización, crecimiento de la población, mala gobernanza
Can Urban Local Ponds Help Tackle Domestic Water Scarcity and Build Resilience? with Reference to South Asian Cities and City Regions	Sistemas hídricos rentables como estanques	Facilitar el abastecimiento del agua, asequible y accesible con baja huella ambiental	Rápida urbanización, hacen que las reservas del agua se reduzcan
Assessment of the Urban Water Security in a Severe Water Stress Area-Application to Palestinian Cities	Indicadores de seguridad hidrica:water resources (WR), water services (WS) and water governance (WG).	Evaluación de los revisores de agua para su evaluación de la seguridad hídrica, reducción de pérdidas de agua mediante la renovación y mantenimiento del sistema de distribución, aumento de la capacidad y eficiencia del sistema de distribución	Disponibilidad de recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, precipitaciones bajas, acceso a la información deficiente, falta de participación activa
Governing Urban Water Conflict through Watershed Councils-A Public Policy Analysis Approach and Critique	Análisis de políticas públicas, investigación de campo, entrevistas con actores clave, leyes nacional, municipal y local	N/A	Es una zona turística, inseguridad hídrica, crecimiento demográfico, tráfico turístico
Proceedings of the Conference How do water stress related issues lead to changes in water governance?	Análisis de contribuciones humanas y sociales para abordar los temas de gobernanza del agua SEMINARIO	Implementación de herramientas de gestión	Población con bajos recursos

Match words with deeds: Curbing water risk with the Sustainable Development Goal 6 index	Lograr la seguridad hídrica sostenible, de conformidad con las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, uso de indicadores	Agua potable, saneamiento, higiene, tratamiento de aguas residuales, productividad hídrica, gestión de los recursos hídricos	Riesgo hídrico, seguridad hídrica comprometida
Management of Water Resources in Agriculture in Chile and its Challenges	Sistemas de riego	Evaluación de riesgos de escasez de agua y evaluación de la sostenibilidad de la reutilización de agua para reducción de riesgos, ODS 6	Crecimiento poblacional, urbanización, contaminación del agua y variabilidad del suministro, capacidad de regulación hidrológica
Enhancing Governance Capacity to Ensure a Long-Term Water Supply: The Case of Windhoek, Namibia	Aplicación del Enfoque del Plan de Acción Urbano, mediante una evaluación de indicadores, Plan de Acción de la Ciudad (ACB) es un método sistemático utilizado para evaluar los sistemas hídricos de manera integrada y diagnóstica, GIRH	Mejorar la eficiencia del uso del agua, aplicar prácticas de reutilización del agua, reducir o redirigir el consumo	Crecimiento demográfico, desarrollo económico, información de libre acceso limitada censuras o manipulación de las partes involucradas,
Environmental, social, and corporate governance activities with employee psychological well-being improvement	Actividades corporativas, prácticas de gestión	Mejora de la vida laboral y familiar	N/A
Identifying Regime Transitions for Water Governance in the Yellow River Basin, China	Transformación de la gobernanza del agua de una cuenca hidrológica, incorporación de un índice integrado de gobernanza del agua (IWGI), indicadores de estrés IS, indicador de propósito IP, indicador de asignaciones IA	Cuantificación más completa de los resultados de gobernanza, correcta armonización de los sistemas humanos e hídricos	Falta de información, cambio climático, regulaciones sistemáticas sobre la asignación del agua, crecientes demandas energéticas e industriales hacen que los propósitos de los servicios hídricos se desvíen
Critical Analysis of Stakeholders in the Municipality of Tarija, Bolivia, in Search of Strategies for Adequate Water Governance to Implement Reverse Osmosis as an Alternative for Generating Safe Water for Its Inhabitants	Estrategias de gobernanza del agua para implementar la osmosis inversa para la generación de agua segura, gestión participativa de los recursos naturales	Eiminación de contaminantes del agua tal y como los metales pesados, promoción de la cooperación regional, la implementación de la OI representa sostenibilidad significativa en términos de eficiencia energética y económica, concientización ambiental	Sistemas de purificación deficientes, conflictos de interés público y sociales no permiten la ejecución de proyectos y nuevas alternativas de inversión pública, falta de conocimiento de la operación de los sistemas de OI, crecimiento poblacional y desarrollo desorganizado, diferencias sociales, políticas y culturales

Global drivers of local water stresses and global responses to local water policies in the United States	SIMPLE-G-US (Modelo Internacional Simplificado de Precios Agrícolas, Uso del Suelo y Medio Ambiente, versión en cuadrícula para Estados Unidos), políticas estadounidenses	Sostenibilidad a largo plazo y seguridad alimentaria, preservemos el área física en lugar del volumen económico.	Alto crecimiento económico, degradación de los recursos hídricos y terrestres
Water resource management and policy evaluation in Middle Eastern countries: Achieving sustainable development goal 6	Alianzas con Jordania, alianzas público privadas, la adopción generalizada de tecnología de desalinización, planes de gestión de recursos hídricos, como el reciclaje de aguas residuales, la captación de agua de lluvia y la reutilización del agua	Uso universal y equitativo del agua, gestión integrada de los recursos hídricos, agua limpia y saneamiento	Crecimiento demográfico, variabilidad climática, e inestabilidad política, persistencia en deficiencias políticas de saneamiento y cooperación transfronteriza, localización en zonas desérticas, aumento del calentamiento global, contaminación y recursos financieros
One water in Los Angeles? Contesting the circular city through infrastructural practices	Reciclaje de aguas residuales, aguas pluviales, economía circular, ciudades circulares, prácticas de infraestructura	Mejora en la gobernanza ambienta urbana, restauración de los ciclos hidrológicos	Urbanización y expansión de la infraestructura hídrica, cambio climático
Accounting for water: A global review and indicators of best practice for improved water governance	Desarrollo de indicadores de mejores prácticas de información hídrica, protocolos existentes de la mano con los SCAE y la elaboración de cuentas del agua	Garantizar la disponibilidad del agua, el saneamiento, seguridad hídrica, gestión de aguas subterráneas	Falta de información oportuna y fiable, cambio climático y el aumento de eventos hidrológicos extremos
MontanAqua: Tackling water stress in the alps water management options in the crans-Montana-sierre region (valais)	Estudio de problema y soluciones relacionadas con el agua desde una perspectiva transdisciplinaria	Visión integral del problema hídrico. Diálogo y consenso entre actores. Opciones de gestión con impacto local.	Cambios climáticos y socioeconómicos, alteran la distribución de los recursos hídricos
Evaluation of water governance processes required to transition towards Water Sensitive Urban Design-An indicator assessment approach for the City of Cape Town	Evaluación de los procesos de gobernanza del agua, restauración de políticas, educación ambiental	Mejora en procesos de gobernanza del agua, mejora de la infraestructura	Cambio climático, rápida urbanización, crecimiento de la población, promedios de precipitación, pobreza, desigualdad y falta de servicios
The water governance reform framework: Overview and applications to Australia, Mexico, Tanzania, USA and Vietnam	Evaluación de reformas hídricas, orientación práctica, GIRH	Mejora en la gobernanza del agua	Aumento de la demanda del agua, variabilidad del agua, cambio climático

Water Stress, Peri-Urbanization, and Community-Based Water Systems: A Reflective Commentary on the Metropolitan Area of Mexico City	Sistemas de gestión centralizada del agua, mediante el desarrollo de infraestructura hidráulica de ingeniería	N/A	Zonas periurbanas de bajos ingresos, condiciones geográficas e hidrológicas, urbanización, asentamientos humanos, deterioro de la infraestructura
Wastewater treatment plants in Mediterranean Spain: an exploration of the relationships between water treatment, water reuse, and governance	Principios de economía circular por medio de las plantas de tratamiento, mejora de las tecnologías para el tratamiento de aguas, examinación de los sistemas de gobernanza de las EDAR, directores ejecutivos de agua	Extensión de usos de agua, aumento del volumen disponible en ríos o lagos	Diferentes calidades obtenidas por cada tratamiento del agua, escasez y contaminación, aceptación pública
Creating resilient water governance for irrigated producers in Mendoza, Argentina	Estudio de caso de una cuenca hidrográfica, entrevista a los productores agropecuarios	N/A	Cambio climático,
Crise hídrica na Macrometrópole Paulista e respostas da sociedade civil	Análisis actual del estrés hídrico a través del modelo de gobernanza para poder proponer mejoras	N/A	Cambio climático, crecimiento demográfico, uso insostenible del agua
Water-related challenges in the governance of the sustainable development nexus: Perspectives from the city of Arequipa, Peru	Realización de entrevistas con informantes clave para identificar los mecanismos que han mejorado la colaboración multisectorial y evaluar los desafíos en la promoción del desarrollo económico, estudio de caso	Desarrollo sostenible en funciones de la gestión integrada de los recursos naturales GIRH, cumplimiento de los ODS	Creciente población humana, competencia por los recursos naturales, desafíos ambientales, socioeconómicos y de gobernanza
Remote survey: Household water security, emotional well-being, and water supply reliability in lowland Ethiopia	Ampliar el suministro de agua, gestión y prestación de servicios de calidad, evaluación de la instalación de pozos motorizados para una mejor seguridad hídrica	Ingresos familiares, mayor bienestar y mejor salud	Infraestructura funcional y prestación fiable de los servicios, cambios climáticos, sequías, perdidas de vida humanas y animales
Paths to water sustainability? A global study assessing the benefits of integrated water resources management.	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), análisis cuantitativo,	Buen estado de los indicadores de sostenibilidad relacionados con el agua,	Situación económica, acuerdos de gobernanza, condiciones ambientales y geográficas

Perceptions on the use of recycled water for watering produce and household chores: A comparison between Israeli and Palestinian consumers	Reciclaje de aguas residuales para el riego agrícola, encuesta muestra para determinar el reciclaje de aguas residuales en Eilat, Israel y Belén	Mejora en la disposición del agua sin distinción de estatus social	Diferencias entre términos de gobernanza, ingresos y acceso a la tecnología, aceptación de los consumidores
Mine water use in Kazakhstan: Data issues, risks, and regulations	Fortalecimiento de la gobernanza ambiental, prácticas modernas de gestión del agua en la minería, imitar las reacciones entre el agua y los desechos de la mina, gestionar los flujos de agua impactada y el tratamiento de efluentes antes de la descarga, establecimiento del balance hídrico, aplicación de nuevas tecnologías	Minimización de la contaminación del agua y aumentar la reutilización de esta en un 80%, incentivar el ahorro del agua, conservación del agua de alta calidad, evitar agravar el estrés hídrico	Escasez de datos públicos sobre el uso del agua en la minería, tasas en crecimiento de la industria minera, falta de información en fuentes públicas

Fuente: elaboración propia.

Discusión general de los hallazgos

El agua es un recurso vital para la supervivencia humana y de los ecosistemas que habitan el planeta (Guansu et al., 2024). Su gobernanza y administración se han vuelto cada vez más cruciales, ya que, aunque tradicionalmente se ha considerado un derecho fundamental, no siempre recibe la atención que merece. En mi opinión, el agua debe ser concebida no solo como un recurso, sino como un bien esencial para la vida. Si la entendemos como un recurso, es necesario reconocer que está siendo profundamente alterada por la falta de una gobernanza adecuada, lo que conduce a una gestión insostenible. Las actividades humanas, altamente dependientes del agua, han modificado su ciclo natural.

Por ello, se han analizado diversas estrategias de gobernanza implementadas en distintos países y contextos, con el fin de entender cómo abordar de manera más eficiente la crisis hídrica. Los problemas de gobernanza del agua suelen tener su origen en una ciudadanía desinformada, poco empática y con escaso interés en los procesos electorales que determinan quién toma decisiones sobre la asignación del recurso.

Desde el inicio, las diferencias territoriales debieron haberse considerado, privilegiando un enfoque de gobernanza basado en una diversidad política que ofreciera un espectro más amplio en lugar de uno centrado en la gobernabilidad. Los artículos revisados destacan la importancia de la cooperación transfronteriza y de la participación de múltiples actores, evidenciando que la gobernabilidad, entendida como un modelo centralizado en pocos actores con intereses comunes, ya no es suficiente para coordinar eficazmente el uso del agua.

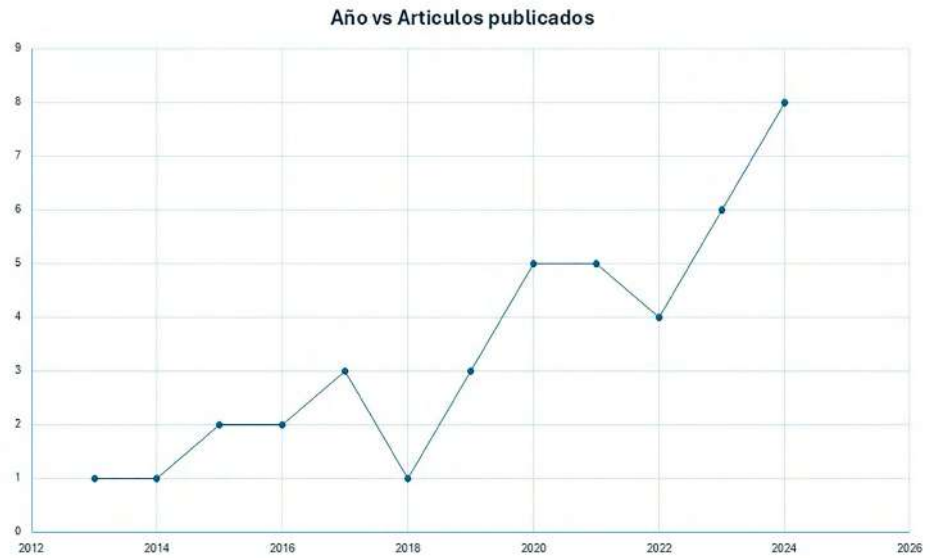
La gobernabilidad, al ser menos democrática y más autoritaria, limita la posibilidad de una gestión inclusiva y adaptada a las realidades locales. A lo largo de esta investigación, se observa que la mayoría de los países aún priorizan modelos de gobernabilidad a nivel nacional. Esta tendencia centralizadora puede ser uno de los factores estructurales que perpetúan la ineficiencia y la desigualdad en el acceso al agua, obstaculizando el avance hacia una gestión verdaderamente justa.

Productividad científica

Con base en el proceso de selección de los 39 artículos referenciados, que abarcan el período comprendido entre 2009 y 2025, se identificó un aumento significativo en la producción académica sobre gobernanza del agua y estrés hídrico a partir del año 2020, con un nuevo repunte en el año 2024 como se muestra en la figura 17.2, que concentró la mayor cantidad de publicaciones.

Los estudios más recientes se centran en la gestión de los recursos hídricos, la gobernanza policéntrica Theresa (2023), y soluciones orientadas a la reutilización del agua (Guansu, 2024, Marketa et al., 2018), como estrategias clave para enfrentar el estrés hídrico y avanzar hacia el cumplimiento del ODS 6 (Cai, 2021). En menor medida, se abordan enfoques cualitativos basados en entrevistas, trabajo de campo y análisis de percepción sobre la efectividad de políticas públicas en contextos específicos (Pacheco et al., 2017 y Fanaian, 2023). Sin embargo, persiste una brecha entre el conocimiento generado y su aplicación práctica, debido a limitaciones económicas en varios países y a la falta de acceso a la información

Figura 17.2. *Productividad científica anual sobe los trabajos de investigación relacionados con la gobernanza del agua y el estrés hídrico*



Fuente: elaboración propia.

por parte de la población, lo que restringe su participación en la gestión del recurso.

Contexto geográfico

El contexto geográfico en la productividad investigativa resulta clave para comprender la gobernanza del agua y el estrés hídrico, especialmente ante el crecimiento demográfico e industrial que incrementa la presión sobre los recursos hídricos (Song S et al., 2024). Este enfoque permite entender cómo varía la atención a esta problemática según la región. La figura 17.3 muestra que países como Estados Unidos, Reino Unido y varias naciones europeas lideran en investigaciones y propuestas para mejorar los modelos de gobernanza del agua.

En Estados Unidos, las investigaciones se orientan hacia la formulación de políticas públicas locales y estrategias de adaptación al estrés hí-

drico en sistemas de riego, con énfasis en sectores como la agricultura y la ganadería (Craddock et al., 2023; Haqiqi et al., 2023). Las medidas propuestas incluyen tanto acciones estructurales como operativas, como la modernización de infraestructura hidráulica y la gestión del recurso a través de planes y políticas públicas (Bhuwan et al., 2019). Además, se destaca la reasignación del agua al sector agrícola según necesidades estacionales y condiciones climáticas (Goetz et al., 2017).

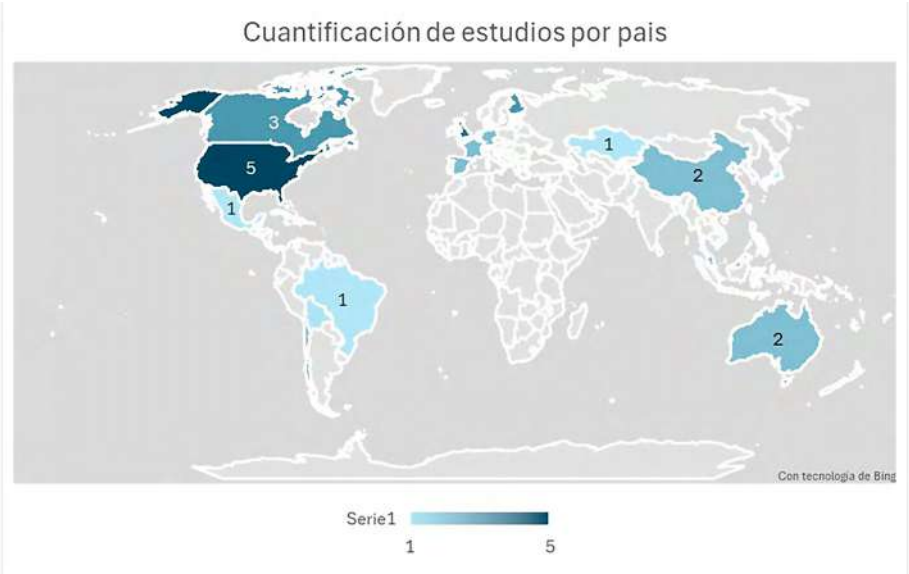
En el Reino Unido, las soluciones se centran en la implementación de sistemas de almacenamiento rentables, como estanques para regulación del agua (Rapin et al., 2020), y en la elaboración de planes urbanos de acción respaldados por indicadores específicos. Un componente esencial es la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), que facilita la coordinación entre distintos niveles de gobierno y sectores (Olivieri et al., 2022). También se han realizado entrevistas a expertos para identificar mecanismos que promuevan la colaboración multisectorial y analizar su impacto en el desarrollo económico (Salmoral et al., 2020), lo cual evidencia la importancia de la participación técnica para lograr soluciones sostenibles (Fanaian et al., 2023).

En Europa, se han impulsado estrategias de alto impacto para mitigar el estrés hídrico, muchas de ellas basadas en tecnologías avanzadas y estructuras de alto costo. Entre estas se encuentran la desalinización del agua de mar (Guansu et al., 2024), la reutilización de aguas residuales tratadas para fines no potables como el riego de áreas verdes y el uso en sanitarios (Marketa et al., 2018), y la implementación de la economía circular como estrategia hídrica (Rault et al., 2013). Asimismo, se ha invertido considerablemente en el desarrollo de tecnologías aplicadas al sector hídrico (Valentin et al., 2023; Yun Chen et al., 2022). Aunque efectivas, muchas de estas medidas presentan limitaciones de acceso y rentabilidad en países menos desarrollados. Sin embargo, Europa se distingue por adoptar medidas a largo plazo que refuerzan la resiliencia y sostenibilidad del abastecimiento hídrico.

Las condiciones geográficas, institucionales y sociales determinan la adopción de estrategias de gobernanza hídrica. Países como Estados Unidos, Reino Unido y naciones europeas, con alta productividad investigativa, aplican modelos avanzados y costosos como tecnologías de desalinización

o la reutilización de aguas residuales (Villena et al., 2023). Sin embargo, estas soluciones no siempre son replicables en regiones con menos recursos. Estrategias más flexibles, como la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), muestran mayor potencial de adaptación (Quientin et al., 2019). Aunque existe una relación entre productividad científica y capacidad de gobernanza, el éxito depende de cómo se ajustan estas estrategias a cada contexto específico.

Figura 17.3. *Productividad de trabajos relacionados con la gobernanza del agua y el estrés hídrico*



Fuente: elaboración propia.

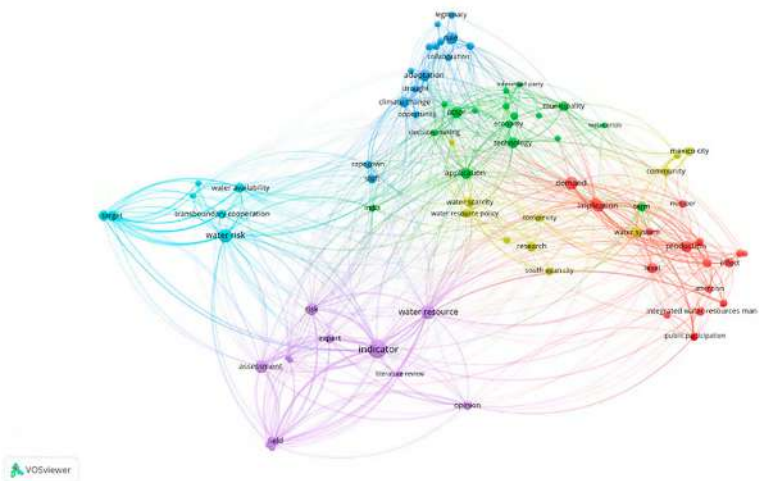
Mapa de coocurrencia y de densidad

En el mapa de coocurrencia (figura 17.4) se identifican seis clústeres temáticos clave sobre gobernanza del agua y estrés hídrico:

- *Clúster azul:* destaca que la gobernanza debe basarse en legitimidad, cooperación y adaptabilidad para lograr una gestión justa y sostenible.

- *Clúster turquesa:* enfatiza la seguridad hídrica, la planificación y la cooperación internacional, cruciales en contextos de escasez compartida.
- *Clúster verde:* subraya el rol de actores clave y factores como tecnología, economía y calidad institucional en una gobernanza resiliente.
- *Clúster amarillo:* señala las barreras que enfrentan comunidades marginadas, llamando a mejorar la transparencia, inclusión y acceso a la información.
- *Clúster rojo:* aborda la presión sobre el recurso y la necesidad de gestión integrada, planificación estratégica y participación ciudadana.
- *Clúster morado:* resalta la importancia del conocimiento técnico mediante indicadores y estudios, esenciales para estrategias adaptadas al cambio climático.

Figura 17.4. *Mapa de coocurrencia de las palabras clave, obtenido de VOSviewer*

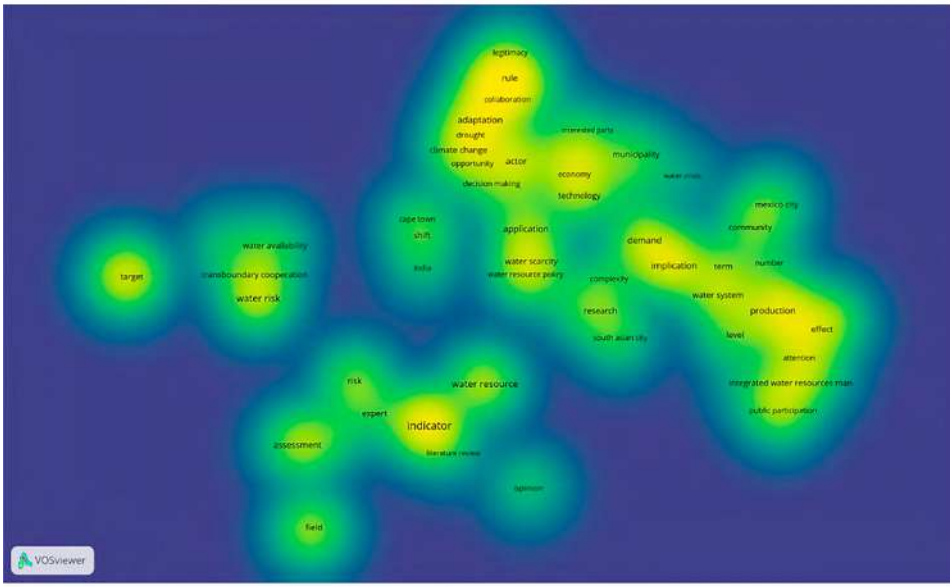


Fuente: elaboración propia.

Nivel de gobernanza

Cuando analizamos los niveles de gobernanza en los estudios revisados, encontramos que más de la mitad, un 56%, se enfocan principalmente en el nivel nacional. Esto nos muestra que, en muchos casos, las estrategias

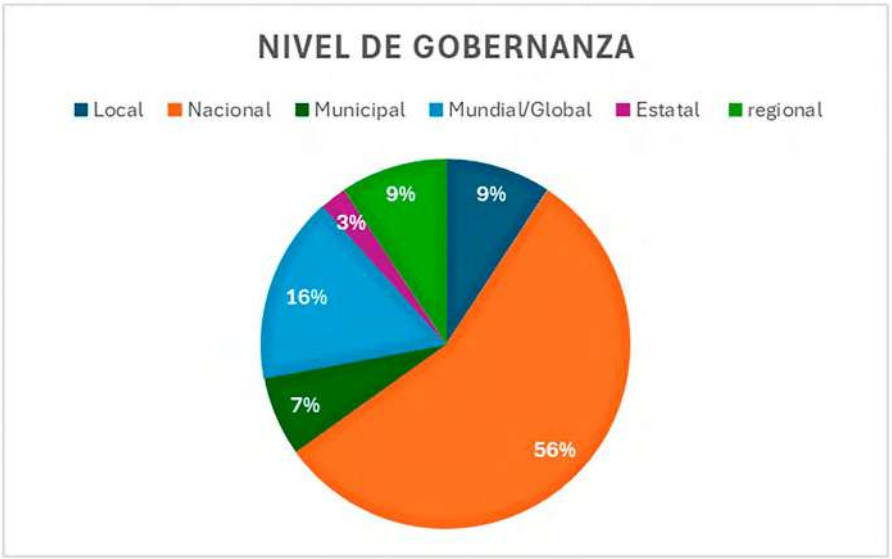
Figura 17.5. *Mapa de densidad de las palabras clave, obtenido de Vosviewer*



Fuente: elaboración propia.

para enfrentar el estrés hídrico se están diseñando desde los gobiernos centrales. Sin embargo, esto también implica un riesgo: que esas decisiones se tomen de forma aislada, sin considerar las realidades locales o sin coordinarse con otros niveles de gobierno. Y sabemos que el agua es un recurso que atraviesa fronteras administrativas y necesita soluciones compartidas. Por eso, es clave avanzar hacia modelos de gobernanza más integrados, que incluyan tanto a lo nacional como a lo local, y promuevan la colaboración entre todos los actores. En segundo lugar, el nivel de gobernanza mundial o global es el que destaca con un 16%, lo que habla de la importancia de la cooperación transfronteriza e internacional, marcos globales de sostenibilidad y acuerdos transfronterizos para afrontar la problemática ante el estrés hídrico. Por otro lado, dentro de la gráfica destacan enfoque locales y regionales los cuales representan el 9% de los casos analizados, mostrando los niveles crecientes en las soluciones descentralizadas adaptadas en contextos más específicos. El nivel municipal engloba un 7% de la muestra, señalando un enfoque más puntual de las administraciones locales en la gestión hídri-

Figura 17.6. *Nivel de gobernanza del agua*



Fuente: elaboración propia.

ca, mientras que el nivel estatal es el menos representativo con un 3%, indicando una posible brecha entre la gobernanza nacional y local.

Estrategias de gobernanza

Análisis crítico de las estrategias de gobernanza del agua

Las estrategias de gobernanza adoptadas por diversos países y localidades para mitigar el estrés hídrico y garantizar una distribución equitativa del recurso abarcan principalmente medidas operativas, de planificación y normativas (Bhuwan et al., 2019). Estas acciones buscan asegurar el acceso sostenible al agua, pero presentan diferencias importantes en cuanto a su frecuencia de aplicación y su efectividad real.

En primer lugar, las estrategias de planificación y formulación de políticas públicas concentran el 39% del total. Este enfoque incluye la elaboración de planes de gestión, la revisión de normativas y la adopción de modelos

de gobernanza policéntrica, en los que múltiples actores (gobiernos, comunidades locales y sector privado) participan en la toma de decisiones (Guansu et al., 2024; Boipelo et al., 2019 y Theresa et al., 2024). La alta presencia de este tipo de estrategias puede explicarse por su viabilidad institucional y política: resultan más accesibles para los gobiernos, al apoyarse en marcos legales existentes y no requerir grandes inversiones iniciales. Sin embargo, su efectividad depende en gran medida de la voluntad política, la capacidad de implementación y la participación de los distintos sectores involucrados.

En segundo lugar, las estrategias estructurales representan el 18%. Estas se enfocan en la expansión de fuentes de agua y la rehabilitación de infraestructura hidráulica, incluyendo tecnologías como la desalinización, ósmosis inversa o la reutilización de aguas residuales (Guansu et al., 2024; Marketa et al., 2018; Villena et al., 2023; Valentín et al., 2023 y Yu et al., 2022). A pesar de su potencial, estas medidas suelen verse limitadas por altos costos económicos y, en ocasiones, por la desconfianza de la población frente a nuevos métodos de abastecimiento.

El análisis territorial constituye el 15% de las estrategias, resaltando la importancia de identificar nuevas fuentes de agua subterránea, como pozos y acuíferos, para una planificación más precisa y adaptada al contexto local (Haqiqi et al., 2023; Olivieri et al., 2022 y Fanaian et al., 2023).

La cooperación transfronteriza e institucional (11%) también juega un papel crucial en la gestión del agua compartida entre distintas jurisdicciones, contribuyendo a aumentar reservas y mejorar la eficiencia del recurso.

Por su parte, las estrategias enfocadas en el sector agrícola y el monitoreo ambiental (9%) buscan mejorar la eficiencia del riego y detectar la sobreexplotación de fuentes, permitiendo respuestas más rápidas y coordinadas.

Sin embargo, es importante llamar la atención sobre las estrategias menos representadas:

La economía circular, que apenas alcanza el 7%, a pesar de su capacidad para promover la optimización y reutilización del agua.

La educación ambiental, con solo un 2%, lo que evidencia un grave vacío en la generación de conciencia social sobre la crisis hídrica.

Figura 17.7. *Estrategias de gobernanza adoptadas por el gobierno para la gobernanza del agua ante el estrés hídrico*

Fuente: elaboración propia.

Esta baja representación de estrategias centradas en el cambio cultural y educativo refleja una debilidad estructural en los enfoques actuales de gobernanza del agua. Sin una población informada y comprometida, incluso los mejores esfuerzos técnicos, normativos o estructurales corren el riesgo de fracasar.

Conclusiones

La revisión de estrategias de gobernanza frente al estrés hídrico revela que, aunque predominan los enfoques centralizados y tecnológicos, estos no siempre son los más eficaces ni los más sostenibles. La escasa presencia de estrategias como la educación ambiental o la economía circular señala un vacío importante en los esfuerzos por transformar culturalmente la relación con el agua y la alarmante situación de la baja participación de la población. Para avanzar hacia una gestión más equitativa y resiliente, es clave transitar de modelos hacia una gobernanza participativa, que articule múltiples niveles de decisión y contemple las realidades sociales, ecológicas y territoria-

les. Solo así será posible responder de manera justa y adaptativa a los desafíos que impone la crisis hídrica.

Referencias

Barrett, T., Feola, G., Khusnitdinova, M. y Krylova, V. (2017). Adapting agricultural water use to climate change in a post-soviet context: Challenges and opportunities in Southeast Kazakhstan. *Human Ecology, 45*(6), 747-762. https://doi.org/10.1007/s10745-017-9947-9

Bilalova, S., Newig, J., Tremblay-Lévesque, L., Roux, J., Herron, C. y Crane, S. (2023). Pathways to water sustainability? A global study assessing the benefits of integrated water resources management. *Journal of Environmental Management, 343,* 118179. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118179

Brugidou, M., Cœur, D., Martin, M., Jobert, A., Loupsans, D. y Viollet, P. (2020). Conclusions du séminaire "Comment les tensions sur l'eau conduisent-elles à en repenser la gouvernance?". *La Houille Blanche, 106*(2), 89-92. https://doi.org/10.1051/lhb/2020021

Cai, J., Zhao, D. y Varis, O. (2021). Match words with deeds: Curbing water risk with the Sustainable Development Goal 6 index. *Journal of Cleaner Production, 318,* 128509. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128509

Caporin, M., Shahbaz, M., Kuziboev, B., Masharipova, M., Allaberganov, S. y Makhmudov, S. (2024). Environmental Kuznets curve for extended BRICS economies: Do women governance and water stress matter? *International Journal of Energy Economics and Policy, 14*(6), 174-183. https://doi.org/10.32479/ijeep.16894

Chen, Y. y Bilton, A. M. (2022). Water stress, peri-urbanization, and community-based water systems: A reflective commentary on the Metropolitan Area of Mexico City. *Frontiers in Sustainable Cities, 4.* https://doi.org/10.3389/frsc.2022.790633

Donoso, G. (2021). Management of water resources in agriculture in Chile and its challenges. *International Journal of Agriculture and Natural Resources, 48*(3), 171-185. https://doi.org/10.7764/ijanr.v48i3.2328

Fanaian, S. y Fanaian, F. (2023). A tug of war between centralization and decentralization: The co-evolution of urban governance and water risks in Guwahati, India. *Environmental Research Communications, 5*(6), 065012. https://doi.org/10.1088/2515-7620/acdc86

Goetz, R. U., Martínez, Y. y Xabadia, À. (2017). Efficiency and acceptance of new water allocation rules: The case of an agricultural water users' association. *The Science of the Total Environment, 601-602,* 614-625. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.226

Grafton, R., Garrick, D., Manero, A. y Do, T. (2019). The water governance reform framework: Overview and applications to Australia, Mexico, Tanzania, U.S.A. and Vietnam. *Water, 11*(1), 137. https://doi.org/10.3390/w11010137

Haqiqi, I., Bowling, L., Jame, S., Baldos, U., Liu, J. y Hertel, T. (2023). Global drivers of local water stresses and global responses to local water policies in the United States. *Environmental Research Letters, 18*(6), 065007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/acd269

Hurlbert, M. y Mussetta, P. (2016). Creating resilient water governance for irrigated producers in Mendoza, Argentina. *Environmental Science & Policy, 58,* 83-94. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.004

Jabari, S., Shahrour, I. y Khattabi, J. E. (2020). Assessment of the urban water security in a severe water stress area: Application to Palestinian cities. *Water, 12*(7), 2060. https://doi.org/10.3390/w12072060

Jacobi, P. R., Cibim, J. y De Souza Leão, R. (2015). Crise hídrica na Macrometrópole Paulista e respostas da sociedade civil. *Estudos Avançados, 29*(84), 27-42. https://doi.org/10.1590/s0103-40142015000200003

Jedd, Th., Sixt, G. N., Schutz, A. y Burbach, M. (2024). Legitimacy in polycentric groundwater governance: Framework conditions identified in Nebraska's Natural Resource Districts. *Environmental Policy and Governance, 35*(2), 187-200. https://doi.org/10.1002/eet.2132

Kalra, R. (2020). Can urban local ponds help tackle domestic water scarcity and build resilience? With reference to South Asian cities and city regions. *Journal of Regional and City Planning, 31*(2), 180-198. https://doi.org/10.5614/jpwk.2020.31.2.5

Kunz, N. C., Fischer, M., Ingold, K. y Hering, J. G. (2015). Why do some water utilities recycle more than others? A qualitative comparative analysis in New South Wales, Australia. *Environmental Science & Technology, 49*(14), 8287-8296. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01827

Madonsela, B., Koop, S., Van Leeuwen, K. y Carden, K. (2019). Evaluation of water governance processes required to transition towards water sensitive urban design: An indicator assessment approach for the city of Cape Town. *Water, 11*(2), 292. https://doi.org/10.3390/w11020292

Meilinger, V. y Monstadt, J. (2025). One water in Los Angeles? Contesting the circular city through infrastructural practices. *Urban Geography, 46*(6), 1432-1455. https://doi.org/10.1080/02723638.2025.2456376

Olivieri, F., Koop, S. H. A., Van Leeuwen, K. y Hofman, J. (2022). Enhancing governance capacity to ensure a long-term water supply: The case of Windhoek, Namibia. *Sustainability, 14*(4), 2387. https://doi.org/10.3390/su14042387

Pacheco-Vega, R. (2020). Governing urban water conflict through watershed councils: A public policy analysis approach and critique. *Water, 12*(7), 1849. https://doi.org/10.3390/w12071849

Piao, X., Xie, J. y Managi, S. (2022). Environmental, social, and corporate governance activities with employee psychological well-being improvement. *BMC Public Health, 22*(1), art. 22. https://doi.org/10.1186/s12889-021-12350-y

Rault, P. A. K., Vreugdenhil, H., Jeffrey, P. y Slinger, J. H. (2013). Readiness and willingness of the public to participate in integrated water management: Some insights from the Levant. *Water Policy, 15*(S2), 101-120. https://doi.org/10.2166/wp.2013.015

Salmoral, G., Zegarra, E., Vázquez-Rowe, I., González, F., Del Castillo, L., Saravia, G. R., Graves, A., Rey, D. y Knox, J. W. (2020). Water-related challenges in nexus governance for sustainable development: Insights from the city of Arequipa, Peru. *The Science of the Total Environment, 747,* 141114. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141114

Schneider, F., Bonriposi, M., Graefe, O., Herweg, K., Homewood, C., Huss, M., Kauzlaric, M., Liniger, H., Rey, E., Reynard, E., Rist, S., Schädler, B. y Weingartner, R. (2016). *MontanAqua:* Tackling water stress in the Alps: Water management options in the Crans-Montana-Sierre Region (Valais). *Gaia: Ecological Perspectives for Science and Society, 25*(3), 191-193. https://doi.org/10.14512/gaia.25.3.11

Song, S., Wang, S., Wu, X., Wei, Y., Cumming, G. S., Qin, Y., Wu, X. y Fu, B. (2023). Identifying regime transitions for water governance in the Yellow River Basin, China. *Water Resources Research, 59*(12). https://doi.org/10.1029/2022wr033819

Šteflová, M., Koop, S., Elelman, R., Vinyoles, J. y Van Leeuwen, K. (2018). Governing non-potable water-reuse to alleviate water stress: The case of Sabadell, Spain. *Water, 10*(6), 739. https://doi.org/10.3390/w10060739

Sukhwani, V., Thapa, K., Shaw, R., Deshkar, S., Mitra, B. K. y Yan, W. (2020). Addressing urban-rural water conflicts in Nagpur through benefit sharing. *Water, 12*(11), 2979. https://doi.org/10.3390/w12112979

Thapa, B. y Scott, C. A. (2019). Institutional strategies for adaptation to water stress in farmer-managed irrigation systems of Nepal. *International Journal of the Commons, 13*(2), 892-908. https://doi.org/10.5334/ijc.901

Vardon, M. J., Le, T. H. L., Martinez-Lagunes, R., Pule, O. B., Schenau, S., May, S. y Grafton, R. Q. (2024). Accounting for water: A global review and indicators of best practice for improved water governance. *Ecological Economics, 227,* 108396. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108396

Varis, O., Kummu, M., Lehr, C. y Shen, D. (2014). China's stressed waters: Societal and environmental vulnerability in China's internal and transboundary river systems. *Applied Geography, 53,* 105-116. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.05.012

Villena-Martínez, E. M., Alvizuri-Tintaya, P. A., Lo-Iacono-Ferreira, V. G., Lora-García, J., Torregrosa-López, J. I., Barrero, L. S., Fernández, A. L. y D'Abzac, P. (2023). Critical analysis of stakeholders in the municipality of Tarija, Bolivia, in search of strategies for adequate water governance to implement reverse osmosis as an alternative for generating safe water for its inhabitants. *Water, 15*(17), 3164. https://doi.org/10.3390/w15173164

Wang, G., Kumar, S., Huang, Z. y Liu, R. (2024). Water resource management and policy evaluation in Middle Eastern countries: Achieving Sustainable Development Goal 6. *Desalination and Water Treatment, 320,* 100829. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100829

Cuarta Parte

GESTIÓN DE RECURSOS Y FLUJOS MATERIALES EN LA ECONOMÍA CIRCULAR

18. Flujo de residuos sólidos urbanos en México: ¿Un camino hacia la economía circular?

Gehovana González-Blanco[1]
Sergio Alcaraz-Ibarra[2]
Iván Cervantes-Zepeda[3]
Iván Gallego-Alarcón[4]
María Clara Rosas-Gutiérrez[5]
Laura White-Olascoaga[6]
David García-Mondragón[7]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.18

Resumen

En México, los diagnósticos básicos para la gestión integrada de los residuos (DBGIR) son el punto de partida en la ejecución de planes y programas de manejo de residuos; son instrumentos que el gobierno federal genera como indicadores de la eficiencia de sus políticas públicas. Un análisis de la línea de tiempo y las políticas implementadas en los DBGIR muestra como ha sido el trayecto en la gestión de los residuos sólidos urbanos y evidencia elementos fundamentales de la economía circular, como recolección, acopio, almacenamiento, transporte, tratamiento, disposición final y valorización. El objetivo de este trabajo es presentar un marco para evaluar los impactos de

[1] Doctora en Biotecnología. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3818-3458
[2] Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID https://orcid.org/0000-0003-2270-5741
[3] Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesor-investigador en el Instituto Interamericano de Tecnologías y Ciencias del Agua de la UAEMex, México. ORCID https://orcid.org/0000-0002-2859-1223
[4] Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID https://orcid.org/0000-0002-9125-6532
[5] Maestrante en Ciencias del Agua en el Instituto Interamericano de Tecnologías y Ciencias del Agua de la UAEMex, México. ORCID https://orcid.org/0009-0008-3806-5367
[6] Doctora en Ciencias Ambientales. Profesora-investigadora de la UAEMex, México. ORCID https://orcid.org/0000-0002-9189-3902
[7] Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID https://orcid.org/0000-0003-1721-5465

la circularidad en la recuperación de recursos a partir de los flujos de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), basándose en el diseño de escenarios de sistemas de tratamiento implementados en México. La FORSU ha sido considerada e incorporada parcialmente a la economía circular, desde el año 2006, a través de la pepena, valorización parcial y disposición final, principalmente. Sin embargo, su gestión se ha visto rezagada en los mismos aspectos, lo cual sigue generando serios problemas ambientales y no se cuenta con estadísticas del volumen real tratado. Los principales tratamientos son compostaje, digestión anaerobia y pirólisis. Sin embargo, no se tiene un número exacto sobre el número de sistemas operando en el país. Además de que la mayoría de los residuos que se tratan son de manejo especial y no urbanos.

Palabras Clave: *flujo de residuos; gestión integral de residuos; residuos orgánicos; residuos sólidos urbanos; valorización de residuos orgánicos.*

Introducción

La generación de residuos sólidos es inherente a la vida de las personas: en las casas, las dependencias públicas y privadas, la recreación, producción, arte, entre otras. En América Latina y el Caribe el manejo de estos residuos es responsabilidad de los gobiernos en sus diversos niveles; sin embargo, por las características, complejidad y volumen de generación, el manejo y gestión se ven superados. En este sentido, los instrumentos de legislación son una herramienta fundamental para controlar y evitar la contaminación del medio biótico (seres vivos) y abiótico (agua, suelo y aire) dentro de los sistemas naturales en una región geográfica o política (Tello-Espinoza, 2018).

La gestión de los residuos en la legislación mexicana

En México, la Constitución Política establece en los artículos 4 y 25 el derecho de toda persona a un medio ambiente sano y que la responsabili-

dad para garantizarlo corresponde al Estado. Derivado de estos artículos, en 1988 se promulgó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), donde se establecen las disposiciones para la protección del ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sin embargo, es en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) publicada en 2003, donde se definen las políticas públicas en materia de prevención, valorización y gestión integral de los residuos (Cervantes-Zepeda, 2022).

En el título cuarto de la LGPGIR, referido a los instrumentos de la política de prevención y gestión integral de los residuos, capítulo I (Programas para la prevención y gestión integral de los residuos), el artículo 25º establece que la Secretaría deberá formular e instrumentar el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, de conformidad con esta Ley, mediante el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos (DBGIR) y demás disposiciones aplicables; cuyo estudio debe considerar la cantidad y composición de los residuos, así como la infraestructura para manejarlos integralmente (DOF, 2003).

Es así como los DBGIR son el punto de partida en la ejecución de planes y programas de manejo de residuos; instrumentos que el gobierno federal mexicano genera como indicadores de la eficiencia de sus políticas públicas. Por otra parte, en el año 2022 la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, se dio a la tarea de compilar el Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (ANRSU), cuyo propósito es reunir en una sola fuente de consulta la información precisa, confiable y actualizada sobre la gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en las diferentes entidades del país, que permita a las autoridades ambientales, conocer, estudiar la problemática y tomar las decisiones pertinentes para mitigarla (INECC, 2022).

Clasificación para la gestión de los residuos

El objetivo de la LGPGIR, desde su publicación a inicios del siglo XXI, fue "garantizar un medio ambiente adecuado y un desarrollo sustentable a tra-

vés de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación" (DOF, 8 de octubre de 2003). Si bien esta Ley a lo largo de veinte años ha sufrido 14 reformas, siempre ha mantenido la esencia de su objetivo, considerando tres tipos de residuos: peligrosos (RP), de manejo especial (RME) y los sólidos urbanos (RSU), cada categoría se describe en la tabla 18.1 (DOF, 8 de mayo de 2023).

Tabla 18.1. *Definición y clasificación de los residuos*

	Definición	***Norma oficial***
Peligroso (RP)	Residuos que poseen al menos una característica CRETIB (corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables y biológico-infecciosos).	NOM-052-SEMARNAT-2005, establece los criterios y un listado de RP.
Manejo especial (RME)	En esta clasificación considera los residuos que superan las 10 Ton/anuales o bien 27.3 kg/d (p.ej. mercados, residuos agrícolas, forestales, etc.) generados en procesos productivos o servicios que por su tamaño y componentes no son considerados RP o RSU.	NOM-161-SEMARNAT-2011, establece los criterios para clasificar los RME.
Sólido urbano (RSU)	Son los residuos que se producen en las casas, establecimientos y vía pública con características domiciliarias y los resultantes de actividades domésticas. Estos residuos se han subclasificado en orgánicos e inorgánicos.	La NOM-083-SEMARNAT-2003, establece las especificaciones de protección ambiental de sitios para la disposición final (SDP) de RSU y de RME.

Fuente: Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (DOF, 2023).

Sin embargo, es hasta la elaboración del DBGIR 2006, donde se integran en un documento las tres categorías de residuos que prevalecen hasta la fecha, y aunque en ese momento no se contaba con una política nacional sobre cómo realizar la gestión de dichos residuos y de precisar las prioridades a seguir en cada caso, dicho instrumento puede ser considerado el inicio de la gestión de los residuos en nuestro país (Gutiérrez Avedoy, 2006; García-Mondragón et al., 2022).

En términos de la economía circular o lo que más adelante se convertiría en este concepto fue en el DBGIR 2012, que se incluye un sistema de información nacional para la gestión integral de los residuos, 3R (reutilizar, recuperar y reciclar) (INECC y Semarnat 2012). Y es hasta el DBGIR 2020, que se plasma el objetivo de, transformar el esquema tradicional del manejo de los residuos en un modelo de economía circular, para el aprovechamiento racional de los recursos naturales y favorecer el desarrollo sus-

tentable en el país (Semarnat, 2020); incluyendo el término de valorización material, así como el concepto de ciclo de vida de los residuos; dentro de la visión nacional hacia la gestión sustentable: cero residuos (García-Mondragón et al., 2022).

Etapas de la gestión integral de residuos sólidos

Generación

De acuerdo con datos del DBGIR 2020, la generación total de residuos en el país se estima en 120 128 t/día y la generación per cápita calculada fue de 0.944 kg/hab/día (Semarnat, 2020); cifra que aumento en un 3% (123 701 t/día) en el 2022 (INECC, 2022), pero la generación per cápita disminuyó a 0.847 kg/hab/día; siendo Baja California y Colima los Estados con menor generación, mientras que el Estado de México y la Ciudad de México (CDMX), los mayores generadores con 16 773 t y 13 149 t respectivamente (INECC, 2022) (figura 18.1).

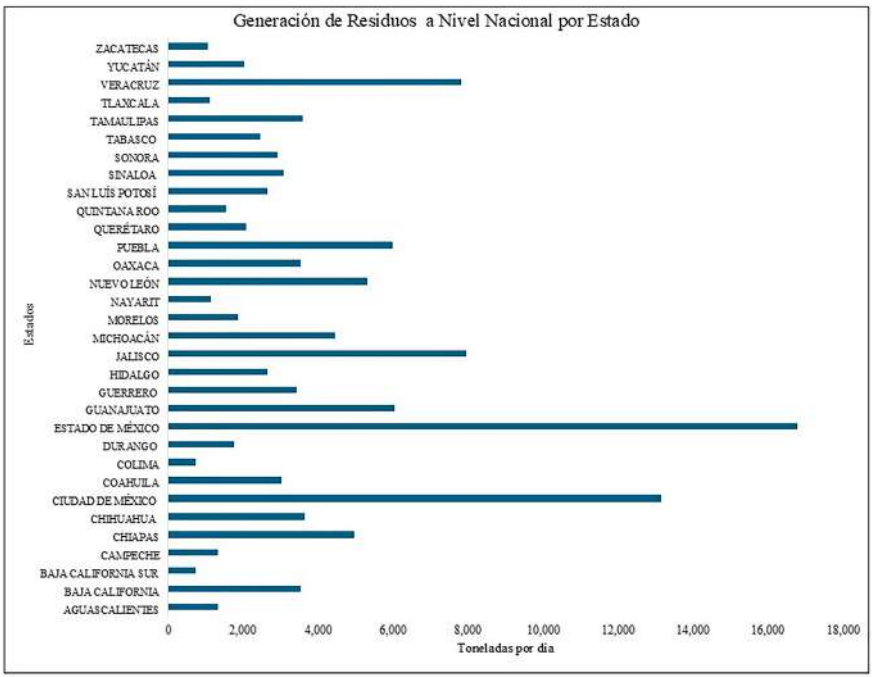
Recolección y transporte

De los residuos generados a nivel nacional se recolectan 100 751 t/día, para una cobertura a nivel nacional del 83.87% (Semarnat, 2020); 29 estados cuentan con más del 75% de recolección en sus municipios, dos con entre el 50 y 75% y solo Guanajuato tiene sistema de recolección en el 24% de sus municipios (figura 18.2) (INECC, 2022).

Transferencia

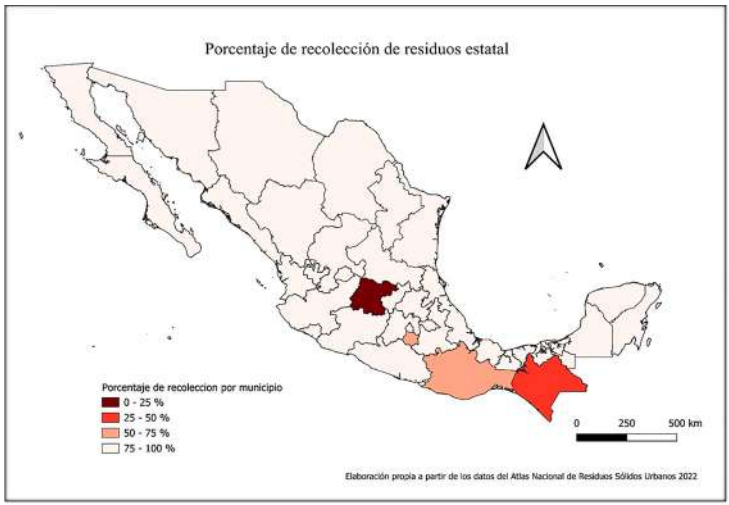
El DBGIR 2020 reporta que en el país existen 127 estaciones para la transferencia de los residuos, ubicadas en 112 municipios de 23 entidades federativas (Semarnat, 2020); a diferencia del Atlas Nacional en el que sólo se

Figura 18.1. *Generación de residuos generados por estado*



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

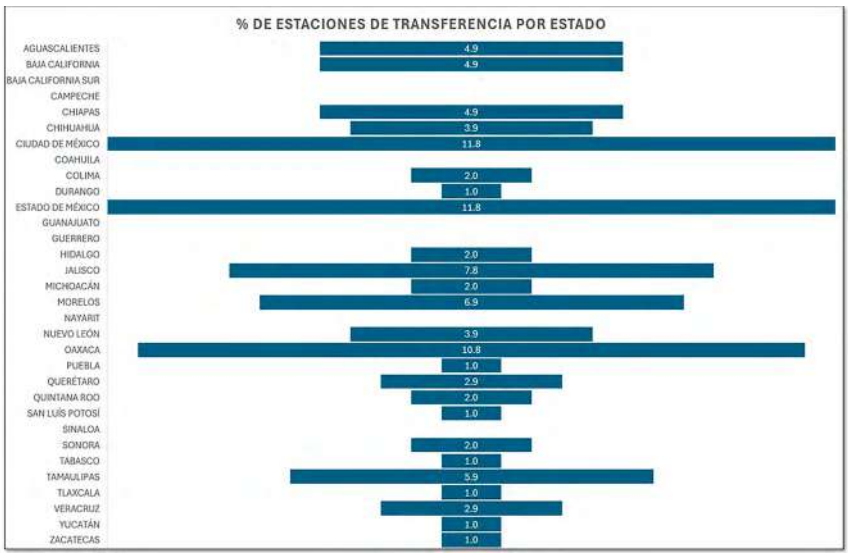
Figura 18.2. *Porcentaje de recolección de residuos estatal*



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

reportan 102, de estos, 24 se encuentran en ubicados en el Estado de México y la CDMX, con 12 unidades cada entidad, mientras que 15 estados no tienen centros de transferencia o sólo tienen uno (figura 18.3) (INECC, 2022).

Figura 18.3. *Porcentaje de estaciones de transferencia de residuos*



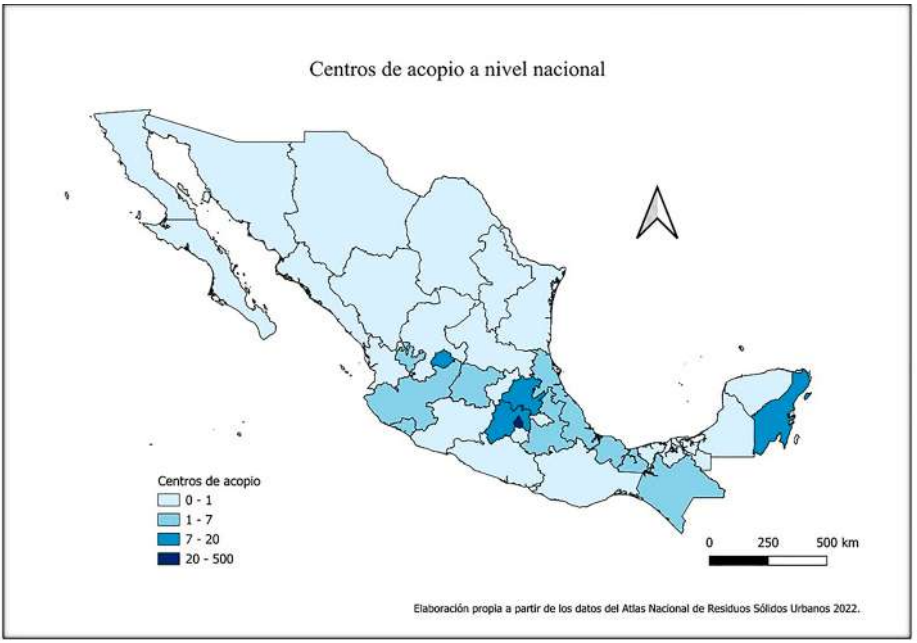
Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

Acopio

El acopio de residuos con potencial de aprovechamiento se realiza en instalaciones establecidas y operadas por los gobiernos estatales o municipales, con el objetivo de recibir los subproductos reciclables que han sido separados en la fuente de origen por los generadores, tanto a título gratuito como entregando a cambio algunos materiales, enseres o dinero (Semarnat, 2020).

No obstante, los datos recabados en el Atlas Nacional (2022) indican que 27 estados tienen menos de 10 centros de acopio en su territorio, mientras que en la CDMX existen 411 espacios dedicados al acopio de residuos inorgánicos, en los que se entrega una retribución económica o en especie (figura 18.4). El establecimiento de estos programas fue en el mar-

Figura 18.4. *Distribución de los centros de acopio por estado*



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

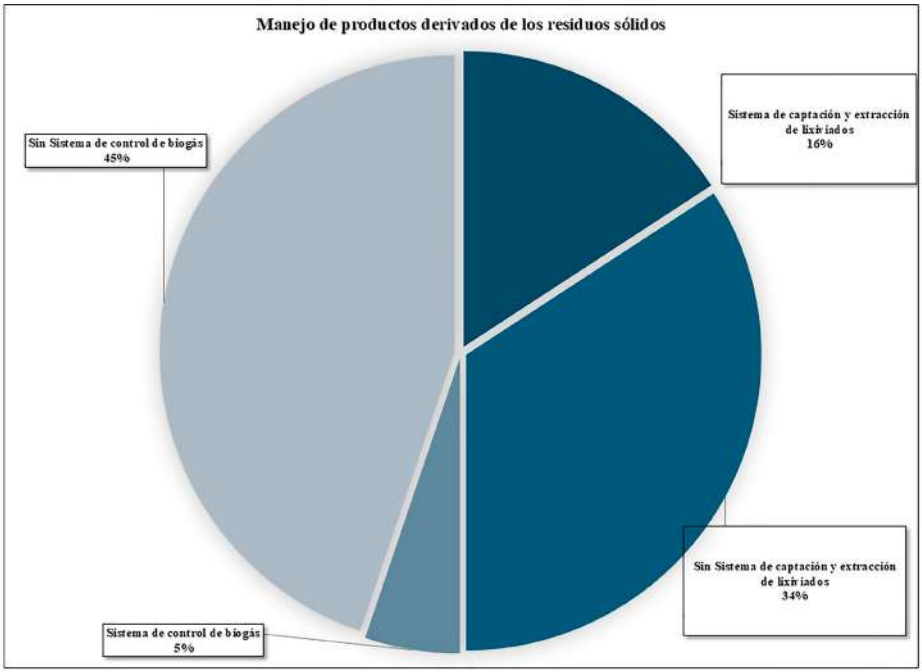
co de políticas dirigidas a la reducción, reutilización y reciclaje de los residuos sólidos inorgánicos urbanos, aunque en el estricto sentido no es economía circular.

Disposición final y revalorización

El análisis de la infraestructura y procesos publicado en el DBGIR (2020), indican que, en los sitios de disposición final (SDF), el 16.30% cuentan con infraestructura para la captación de lixiviados, y el 9.67% con infraestructura para la captura de biogás; cifras similares a las publicadas en el Atlas Nacional (2022) con 16% de sistemas para captación de lixiviados y 5% de biogás (figura 18.5).

Entre las medidas que se han implementado para mitigar el impacto, en el cambio climático, por la generación de gases de efecto invernadero,

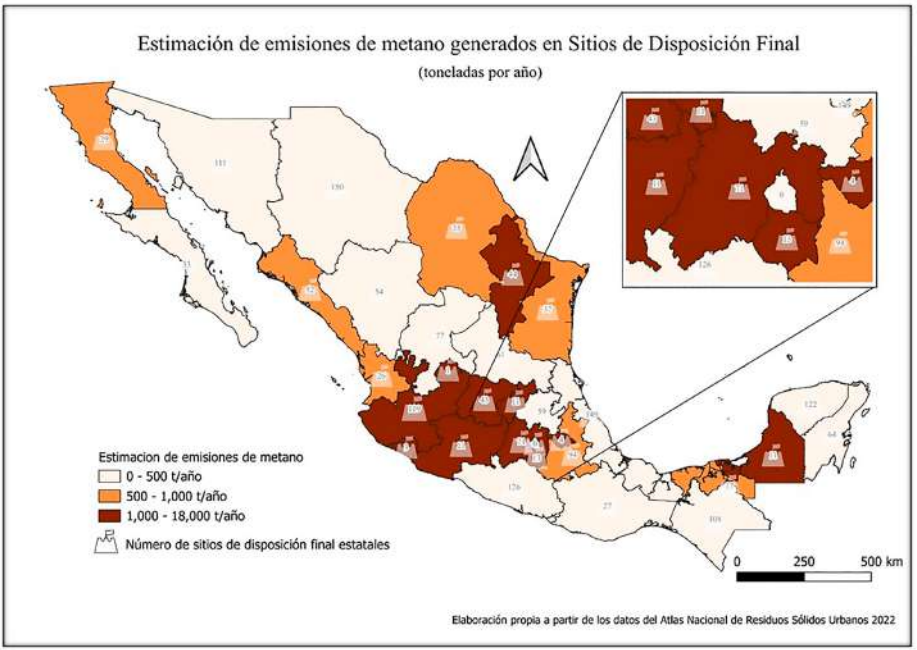
Figura 18.5. *Manejo de lixiviados y biogás producido en los rellenos sanitarios*



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

fue instalar sistemas para la captación y quema de biogás (figura 18.6), en aquellos rellenos sanitarios que dan servicio a más de 50 mil habitantes, con la finalidad de dar cumplimiento a los diversos tratados. En este sentido la CDMX es la única entidad que no genera metano, debido a que no cuenta con sitios de disposición final, sin embargo, sus emisiones se reflejan indirectamente en las zonas conurbadas, principalmente, el Estado de México. De acuerdo con el Atlas Nacional (2022), en el país existen 1 762 sitios de disposición, de los cuales Chihuahua y Veracruz presentan alrededor de 150, mientras que Aguascalientes, Colima y Tlaxcala tienen menos de 10 (figura 18.6).

Figura 18.6. *Estimación de emisiones de gas metano por sitios de disposición final y número de SDF*



Fuente: elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos (2022).

Flujo de los residuos

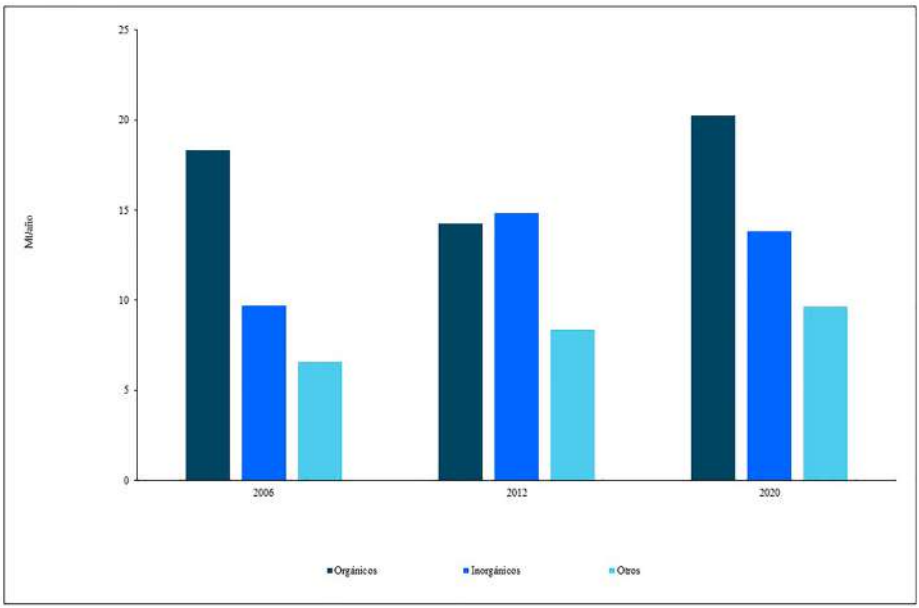
Considerando los volúmenes de generación diarios de RSU en México, la producción anual asciende a poco más de 43.8 millones de toneladas (Mt/año), de las cuales el 31.56% son inorgánicos, el 46.42% orgánicos y el porcentaje restante corresponde a residuos fuera de estas dos clasificaciones como: los residuos sanitarios, trapos, loza, etc. (Semarnat, 2020).

Los RSU, por su heterogeneidad, han sido subclasificados en la LGPGIR, en inorgánicos y orgánicos para facilitar su separación primaria, es decir en el origen, con la finalidad de valorizarlos (Art. 18 fracción reformada DOF, 19 de marzo de 2014). No obstante, la valorización sólo se enfocó en los residuos inorgánicos (papel y cartón, vidrio, metales y plásticos, principalmente) (Semarnat, 2020), a través de las 3r con el fin de promover una economía circular con enfoque del reciclaje (Morocho, 2018); acción

que ha tenido una buena respuesta por parte de la sociedad, pero que sigue siendo insuficiente al solo reciclarse el 9.6% del volumen de residuos inorgánicos recolectados que haciende a no más de 1.2 Mt/año (Semarnat, 2020). Es importante señalar que la economía del reciclaje no es economía circular, ya que no es restaurativa y regenerativa, ya que los productos, componentes y materias no mantienen su utilidad y valor máximo (Morseletto, 2020).

La situación de los residuos orgánicos es aún más alarmante, por sus volúmenes de generación, que en 2020 a nivel nacional superó en un 14.6% el volumen de los residuos inorgánicos (figura 18.1). La superioridad de residuos orgánicos se ha asociado con la situación económica, es decir, a menores ingresos mayor volumen de residuos orgánicos y a mayores ingresos predominaran los residuos inorgánicos (Kaza et al., 2017). En el 2012, la generación de residuos orgánicos (figura 18.7) suponía que el país migraba, hacia una menor cantidad, sin embargo, en el 2020 se evidenció lo contrario.

Figura 18.7. *Volumen de generación de residuos urbanos*



Fuente: elaboración propia a partir de DBGIR (2006, 2012 y 2020).

Si bien todos los residuos tienen un efecto negativo al ambiente, los residuos orgánicos por su naturaleza sirven como caldo de cultivo para vectores de enfermedades (roedores, moscas, cucarachas, etc.) (Hernández-Nazario et al., 2018) y, como consecuencia natural de su putrefacción, contribuyen en la emisión de gases de efecto invernadero (metano y dióxido de carbono) y lixiviados (Anyaoku y Baroutian, 2018). Bajo este contexto, representantes de los distintos sectores propusieron planes y acciones para la reducción y tratamiento de residuos orgánicos a través de su aprovechamiento con plantas de compostaje y de digestión anaerobia para la obtención de energía en forma de biogás (LGPGIR, 2023; Semarnat, 2020).

Tratamiento y valorización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

Hasta hace algunos años, la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) eran considerados de bajo valor. No obstante, las opciones de tratamiento de los FORSU han mejorado considerablemente. Mientras que al inicio lo más avanzado era la separación balística de los residuos aprovechables (separación por medio de cribado en función del tamaño y peso de partícula) (Pérez-Navarro, 2022), hoy en día la adopción de tecnologías más complejas, como las plantas de tratamiento mecánicas-biológicas (MBT, por sus siglas en inglés) ha tomado gran importancia (Lara-Topete et al., 2023).

Estas plantas, que combinan la separación mecánica de materiales recuperables con la estabilización biológica de la materia orgánica, han demostrado ser una opción eficiente para la gestión de RSU. Si bien su implementación exitosa lleva más de 30 años en países desarrollados, su adopción en países en desarrollo, como los de América Latina incluyendo a México, requiere estudios de viabilidad adicionales para asegurar su efectividad.

En México, las alternativas más empleadas para el tratamiento de la FORSU consistían principalmente en compostaje. Sin embargo, esta alternativa de tratamiento se enfoca principalmente en residuos orgánicos de mercados y centrales de abasto los cuales, por sus volúmenes de produc-

ción, son considerados residuos de manejo especial (RME). Si bien el tratamiento de los FORSU ha tomado gran importancia en años recientes, las técnicas y procedimientos para su tratamiento aún se encuentran restringidos y enfocados principalmente a los RME. Afortunadamente, estos procesos de tratamiento aplicados a los RME también son aplicables a la FORSU, pero las tendencias actuales implican llegar hasta la valorización del residuo, no solo a su tratamiento para disposición final.

Las nuevas tendencias apuntan hacia alternativas más sustentables para el manejo, tratamiento y valorización de la FORSU. Estas opciones se centran principalmente en la transformación de la FORSU en productos con valor agregado, como alimento para ganado o materiales de construcción (Orozco-Álvarez et al., 2025). Una alternativa emergente es la bioestabilización, que consiste en el uso de agentes biológicos, como organismos y/o microorganismos, capaces de degradar y transformar la materia orgánica en subproductos de interés biotecnológico, económico e industrial. Dentro de los procesos más representativos de bioestabilización se encuentran el compostaje y vermicompostaje, que producen compost, y la digestión anaerobia, que genera biogás (Aguiar et al., 2021).

Otras alternativas de bioestabilización de los FORSU incluyen la biodeshidratación o secado biológico, un proceso que aprovecha la energía generada por la actividad metabólica de los microorganismos presentes (Maia et al., 2023). Este tratamiento permite reducir significativamente el contenido de humedad de los FORSU, lo que facilita su manejo, disminuye el riesgo de putrefacción y evita la generación de lixiviados.

De acuerdo con el Atlas Nacional publicado en el 2022 por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en México se tienen 16 plantas para el tratamiento de residuos orgánicos, 15 de ellas de compostaje y una de digestión anaerobia (INECC, 2022). Estos datos son inferiores a lo reportado en 2020 en DBGIR, que reportó 18 plantas de compostaje y cinco de digestión anaerobia (Semarnat, 2020). Sin embargo, ambos documentos coinciden en que la mayoría de las plantas se encuentran localizadas en el centro del país, ya que la CDMX y el Estado de México albergan siete y cuatro plantas de compostaje respetivamente, además cada entidad tiene una planta de digestión (Planta de Biodigestión Atlacomulco, Estado de México y Planta de digestión alcaldía de Milpa Alta), no obstante am-

bas plantas no procesa residuos orgánicos de origen domiciliario, sino RME de grandes generadores como restaurantes, mercados, rastros y agrícolas (residuos de nopal).

Si bien los datos no son precisos se reporta que se tratan poco más de 505 mil toneladas de residuos orgánicos urbanos al año, vía compostaje (INECC, 2022), una cantidad reducida e insuficiente para el volumen de residuos orgánicos que se generan en México. Respecto a la biodigestión, no hay valores reportados sobre la producción de energía renovable en forma de calor, electricidad o biogás. Sin embargo, el marco legal nacional si contempla la generación y comercialización de fuentes de energía renovables y tecnologías limpias (tabla 18.2).

Tabla 18.2. *Marco legal vigente de fuentes renovables y tecnologías limpias*

Alcance	*Marco legal*
Generación de fuentes de energía limpia	Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y Financiamiento de la Transición Energética Ley de Bioenergéticos Ley de la Industria Energética Ley de la Comisión Reguladora de Energía Ley de Aprovechamiento Sustentable de Energía Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica

Fuente: Diagnósticos básicos para la gestión integral de los residuos (2020) y Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

Para lograr una economía circular de los residuos orgánicos en México, el flujo de los residuos debería seguir un enfoque integral y sostenibles.

- Separación en el origen
- Recolección selectiva
- Procesamiento y valorización
- Comercialización: mercado de compost y productos derivados
- Incentivos económicos, que fomenten la separación, la producción y el uso de los productos derivados de residuos orgánicos.
- Educación ciudadana y ambiental, que destaque la importancia de la separación y aprovechamiento de residuos, así como los beneficios ambientales de esto.

La implementación de un flujo de residuos podría reducir su cantidad en los vertederos y generar productos derivados como biofertilizantes y energía renovable de forma sostenible.

El aprovechamiento de los residuos conocido como "Waste to Energy" es una estrategia que considera a los residuos orgánicos como materia prima para generar energía, que se planteó en 2017 como una alternativa viable para recuperar energía en forma de calor, electricidad o combustibles alternos, como el biogás, con el objetivo de reducir el impacto ambiental de los desechos orgánicos y gestionarlos de manera segura (Mutz et al., 2017).

Casos de estudio

Uno de los casos más destacados en la revalorización de los FORSU es la planta de compostaje de Bordo Poniente, ubicada en la CDMX. Esta planta no solo representa un éxito a nivel nacional, sino que se considera la experiencia más significativa en América Latina y el Caribe, debido a su capacidad instalada de tratamiento de 2 500 toneladas por día (Manzi Tarapués et al., 2020). La producción de compost de calidad tipo B, adecuado para su uso en agricultura y áreas verdes, constituye uno de los principales atractivos de esta instalación.

Por otro lado, otra alternativa prometedora para la valorización de residuos orgánicos y la mitigación del cambio climático es reemplazar la combustión de los residuos por pirólisis, un proceso que convierte los residuos en biocarbón (Galindo-Segura et al., 2023). El biocarbón, además de su potencial para la remediación de suelos agrícolas, ha demostrado ser efectivo en la descontaminación de aguas y suelos, debido a su capacidad como material adsorbente de metales pesados, herbicidas y colorantes (Ghani et al., 2022; Kumar et al., 2022).

La obtención de biocombustibles a partir de la FORSU como el etanol (Flores et al., 2019), el biodiesel a partir de aceites usados (León et al., 2024) o el biogás a partir de residuos orgánicos y de nopal (Vázquez-Mata et al., 2022) son ejemplos de casos de éxito enfocados en la revalorización de la FORSU en México. Estas alternativas biotecnológicas resultan eficien-

tes para el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de bioenergía, con un alto desarrollo industrial que la convierte en una opción ideal para diversos procesos. Sin embargo, para mejorar la viabilidad económica, es necesario aumentar la capacidad de tratamiento de las plantas de revalorización de los residuos, ya que los costos de instalación y operación aún son elevados.

Existen diversas líneas de investigación que buscan optimizar la productividad de los sistemas de bioestabilización, como el aumento de temperatura o la digestión en fase sólida, lo cual podría reducir el tamaño de los digestores. Para superar los problemas derivados de compuestos inhibitorios, se están evaluando aditivos como adsorbentes y bioelectrodos (Ellacuriaga et al., 2021), que protegen la biomasa microbiana y aceleran la degradación de intermediarios. Estas estrategias pueden reducir los costos de inversión y operación, haciendo de la digestión anaerobia un proceso clave en el modelo de economía circular, permitiendo la producción de bioenergía y el reciclaje de nutrientes y compuestos intermedios.

Es importante recalcar que actualmente existen muchas alternativas para la valorización de los FORSU. Sin embargo, muchos de ellos incluidos algunos de los aquí mencionados, aún se encuentran en etapa de estudio a nivel laboratorio o pequeña escala. Las tendencias indican que es viable incrementar la capacidad de tratamiento y valorización de los FORSU. Además, con la valorización de los FORSU se justifica plenamente la inversión inicial de los sistemas de tratamiento, pues el retorno de la inversión es seguro con la comercialización de los subproductos generados en el tratamiento.

Conclusiones

Los residuos sólidos urbanos se han convertido en un desafío, con una mayor generación de residuos y composiciones materiales más complejas, que a menudo se mezclan con elementos tóxicos y peligrosos. El flujo de residuos es complejo, por el sistema de gestión que, aunque se ha propuesto en la legislación, es rebasado por la linealidad de consumo. Si bien hay un filtrado de residuos inorgánicos, la problemática de los residuos orgáni-

cos sigue sin ser atendida, aun y cuando suponen factores de riesgo biótico y abióticos. Sin embargo, si los residuos orgánicos son recolectados desde su origen, pueden ser materia prima para la generación de productos de valor energético.

Referencias

Aguiar, S., Arboleda, L. y Uvidia, H. (2021). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como alternativa en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Alfa, 5*(15), 649-660. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.145

Anyaoku, C. C. y Baroutian, S. (2018). Decentralized anaerobic digestion systems for increased utilization of biogas from municipal solid waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90,* 982-991. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.009

Cervantes Zepeda, I., Gallegos Alarcón, I., García Mondragón, D. y González Blanco, G. (2022, septiembre-diciembre). Cronología de la legislación de residuos en México. *La Ciencia y el Hombre,* (3), 44-47.

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=688657&fecha=08/10/2003

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2023). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos (Reforma publicada el 8 de mayo de 2023). https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf

Ellacuriaga, M., García-Cascallana, J. y Gómez, X. (2021). Biogas production from organic wastes: Integrating concepts of circular economy. *Fuels, 2*(2), 144-167. https://doi.org/10.3390/fuels2020009

Flores, R. O., Muñoz, A. S., Medina, A. G. y Conrado, K. P. (2019). Análisis de factibilidad de un proceso de producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos como alternativa sustentable al manejo de residuos sólidos urbanos. *Jóvenes en la Ciencia, 5*(1).

Galindo-Segura, L. A., Pérez-Vázquez, A., Ramírez-Martínez, A., López-Romero, G. y Gómez-Merino, F. C. (2023). El manejo del bagazo de naranja en la zona centro del estado de Veracruz. *Terra Latinoamericana, 41*.

García-Mondragón, D., Cervantes-Zepeda, I., Gómez-Demetrio, W., Gallego-Alarcón, I., García-Pulido, D. y González-Blanco, G. (2023). Gestión de los residuos sólidos en México: Análisis cualitativo de los diagnósticos básicos. *Inter Disciplina, 11*(30), 215-242. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2023.30.81788

Ghani, J., Nawab, J., Khan, S., Khan, M. A., Ahmad, I., Ali, H. M., … y Dinelli, E. (2022). Organic amendments minimize the migration of potentially toxic elements in soil-plant system in degraded agricultural lands. *Biomass Conversion and Biorefinery, 14,* 6547-6565. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02816-3

Gutiérrez Avedoy, V. (Coord.). (2006). *Diagnóstico básico para la gestión integral de resi-*

duos (DBGIR). Instituto Nacional de Ecología / Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/196519/Diagnostico_basico_pgir_2006.pdf

Hernández-Nazario L., Benítez-Fonseca M. y Bermúdez-Torres J. M. (2018). Caracterización fisicoquímica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el centro-urbano Abael Samaría de Santiago de Cuba. *Tecnología Química, 38*(2), 369-379.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2012). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos.* https://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2022). *Atlas nacional de residuos sólidos urbanos.*

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. y Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050.* World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

Kumar, A., Bhattacharya, T., Shaikh, W. A., Chakraborty, S., Owens, G. y Naushad, M. (2022). Valorization of fruit waste-based biochar for arsenic removal in soils. *Environmental Research, 213,* 113710. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113710

Lara-Topete, G. O., Robles-Rodríguez, C. E., Orozco-Nunnelly, D. A., Vázquez-Morillas, A., Bernache-Pérez, G. y Gradilla-Hernández, M. S. (2023). A mini review on the main challenges of implementing mechanical biological treatment plants for municipal solid waste in the Latin America region: Learning from the experiences of developed countries. *Waste Management & Research, 41*(7), 1227-1237. https://doi.org/10.1177/0734242X231154143

León, J. C. T., Alfaro, T. A. y Palomino, G. I. B. (2024). Optimización de los parámetros de producción del biodiésel a partir de aceite usado de las pollerías. *Ambiente, Comportamiento y Sociedad, 7*(1), 20-35. https://doi.org/10.51343/racs.v7i1.1481

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR). (2023). http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf

Maia, G. D., Horta, A. C. y Felizardo, M. P. (2023). From the conventional to the intermittent biodrying of orange solid waste biomass. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 188,* 109361. https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109361

Manzi Tarapués, V., Rendón Muñoz, L. I., Herrera Rodas, M., Gandini Ayerbe, M. A. y Marmolejo Rebellón, L. F. (2020). Estado de la valorización de biorresiduos de origen residencial en grandes centros urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 36*(3), 755-774. https://doi.org/10.20937/rica.53341

Morocho, F. R. A. (2018). La economía circular como factor de desarrollo sustentable del sector productivo. *Innova Research Journal, 3*(12), 78-98.

Morseletto, P. (2020). Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy. *Journal of Industrial Ecology, 24*(4), 763-773. https://doi.org/10.1111/jiec.12987

Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C. y Groos, T. (2017). *Waste-to-energy options in municipal solid waste management*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

Orozco-Álvarez, C., Gervacio-Hernández, A., Moreno-Rivera, M. D. L., Piña-Guzmán, B. y Robles-Martínez, F. (2025). Microbiological and physicochemical characterization during biodrying of organic solid waste. *Processes, 13*(1), 78. https://doi.org/10.3390/pr13010078

Pérez Navarro, S. B. (2022). *Análisis comparativo de la normatividad y gestión sobre residuos sólidos urbanos en México y Japón*.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integran de los residuos.* https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf

Tello Espinoza, P. (2018). Política y legislación de la gestión de los residuos en América Latina y el Caribe. En P. Tello Espinoza, D. Campani y D. R. Sarafian (Eds.), *Gestión integral de residuos sólidos urbanos.* (pp. 13-34). AIDIS. https://aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/08/GESTION-INTEGRAL-DE-RESIDUOS-SOLIDOS-URBANOS-LIBRO-AIDIS.pdf

Vázquez-Mata, N., Acosta-Camacho, P., Camacho-Parra, E., Rocha-Mendoza, D. y Cano, I. G. (2022). Aprovechamiento de subproductos y residuos generados en la Central de Abastos de la Ciudad de México. *Biotecnología y Sustentabilidad, 7*(1), 119-140.

19. Reutilización y electrificación de vehículos como camino hacia una movilidad más eficiente

Ángel de Jesús Mc Namara Valdés[1]
Rodrigo Flôrencio da Silva[2]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.19

Resumen

El uso de vehículos de combustión interna para el traslado de personas y mercancías trae consigo efectos negativos en el medio ambiente y en el uso de los recursos naturales. Las emisiones que emiten los motores de combustión interna, ya sea que utilicen gasolina o diésel como combustible, causan entre lo más destacable, el efecto invernadero con los gases de efecto invernadero (GEI) como el CO_2 problemas a la salud pública con la emisión de material particulado, los óxidos de nitrógeno y de azufre entre otros gases que son nocivos para la salud humana. Considerando también el uso de recursos para hacerlos funcionar y, en sí, para construir unidades de transporte, ya sean de transporte público o de transporte privado, cada vez la disponibilidad de recursos es menor y su extracción se vuelve más costosa por lo que reutilizar elementos como el chasis, la estructura del vehículo, las ventanas y los materiales del interior sólo cambiando la motorización tienen un efecto positivo en el impacto de los recursos y el costo del mismo vehículo en términos económicos. El objetivo de este trabajo es compilar casos en los que se haya llevado a cabo un cambio en la motorización a un vehículo existente que pase de un motor de combustión interna a un motor eléctrico para seguir prestando servicio, pero de una manera

[1] Doctorante en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-9741
[2] Doctor en Medio Ambiente por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Ticomán, del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9644-7645

más eficiente y con menor impacto al ambiente. La metodología que se siguió es una revisión teórica de publicaciones referentes a la conversión de motorización de vehículos seguida de la búsqueda de publicaciones en la web relacionadas con la temática de conversión de vehículos. Los resultados muestran que la conversión de la motorización de los vehículos representa una extensión de vida útil de un vehículo existente, lo que evita la fabricación de un nuevo vehículo.

Palabras clave: *vehículos, motorización, combustión interna, motor eléctrico.*

Introducción

Durante mucho tiempo, el transporte público y privado ha estado fundamentado en el uso de motores de combustión interna, esto debido a un histórico en el desarrollo de esta tecnología que por mucho tiempo ha sido el pilar de la movilidad de las personas y de las mercancías. El sector del transporte es responsable de más del 24% de las emisiones globales de CO_2 relacionadas con la energía (Filonchyk et al., 2024), un porcentaje que sigue creciendo debido a la demanda de vehículos particulares y de carga en economías emergentes.

Los motores de combustión interna, que han dominado el transporte por más de un siglo, no solo emiten dióxido de carbono CO_2, sino también contaminantes críticos como material particulado (PM), óxidos de nitrógeno NO_x y otros compuestos volátiles, vinculados a 7 millones de muertes prematuras anuales por contaminación del aire (OMS, 2024). Tomando en cuenta toda la cadena de extracción de petróleo, el proceso de refinación, la logística necesaria para hacer llegar los combustibles, y el consumo energético por cada automóvil más la extracción mineral para fabricar nuevos vehículos agrava la degradación de ecosistemas, desde la deforestación por pozos petroleros hasta la sobreexplotación de litio para baterías. Este panorama exige soluciones que equilibren la necesidad de movilidad con la urgencia climática, y la reutilización de vehículos existentes mediante electrificación emerge como una estrategia pragmática.

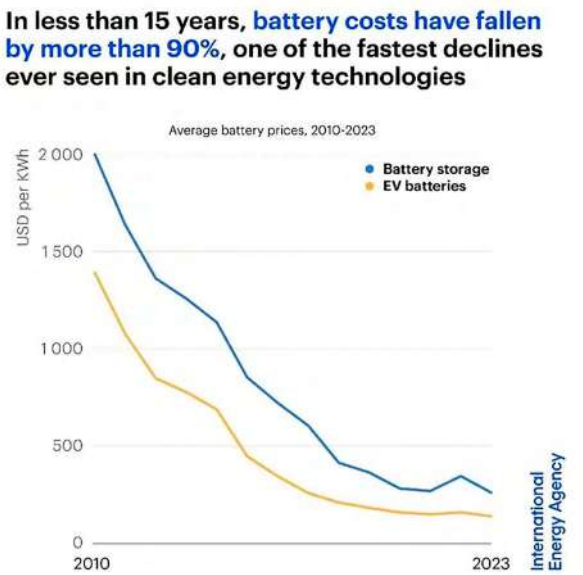
La electrificación del transporte se ha centrado en la producción de vehículos nuevos, pero este enfoque ignora el costo ambiental de fabricarlos, un automóvil eléctrico requiere hasta un 60% más de energía en su producción que uno convencional, debido a la minería de metales para baterías (Lyu et al., 2022). Desechar flotas completas de vehículos con chasis y carrocerías en buen estado contradice los principios de la economía circular. Estudios de ciclo de vida demuestran que reconvertir un vehículo de combustión interna a eléctrico puede reducir la huella de carbono total en un 40-50% comparado con comprar un vehículo nuevo (Innocenti et al., 2024), ya que se aprovechan materiales existentes y se evita el gasto energético de fundir acero o moldear plásticos.

Ampliando el horizonte más allá del impacto ambiental, la electrificación de vehículos usados tiene ventajas económicas tangibles. Para usuarios particulares, convertir un automóvil a eléctrico cuesta entre 5 y 20 mil dólares, dependiendo del modelo y las características que se requieran (Hoeft, 2021) frente a los 30 o hasta 100 mil dólares que puede costar un vehículo eléctrico nuevo (Rapson y Muehlegger, 2023). En el transporte público, ciudades como Bogotá y Lisboa han demostrado que modernizar buses diésel con motores eléctricos reduce costos operativos en un 35% (Taborda et al., 2023; Vargas y Durán, 2024), esto gracias a la disminución de mantenimiento y combustible que proporciona una propulsión eléctrica. Para economías en desarrollo como México y la India esta estrategia es clave, por ejemplo, la conversión masiva de *rickshaws,* vehículos de pequeña capacidad para desplazamientos urbanos, que funcionan con gasolina a eléctricos ha creado 250 mil empleos locales en talleres especializados (Tirpude, 2021). Sin embargo, el acceso a tecnología asequible y marcos regulatorios claros sigue siendo un desafío.

Uno de los principales retos que enfrentan los vehículos eléctricos en general es la existencia de mitos sobre su funcionamiento. A pesar de sus ventajas, la reconversión enfrenta escepticismo, uno de los mitos persistentes es que los vehículos convertidos son menos seguros o eficientes, sin embargo, pruebas en laboratorios europeos como el TÜV Rheinland, han certificado que, con componentes adecuados, su rendimiento iguala al de los vehículos eléctricos originales (Kumar et al., 2025). Otro de los obstáculos presentes es la creencia de que las baterías son costosas, sin embargo,

se ha demostrado que las baterías cada vez disminuyen su costo, para el año 2023, se llegó a una reducción de más del 90% de reducción de sus costos desde el año 2010, tanto baterías para autos y almacenamiento de energía. En la figura 19.1 se muestra una gráfica donde se aprecia la reducción de los costos de las baterías en un periodo del año 2010 al 2023.

Figura 19.1. *Promedio de costo de las baterías del 2010 al 2023*



Fuente: International Energy Agency.

El objetivo de este trabajo es compilar evidencia técnica que demuestre la viabilidad de la reconversión vehicular como herramienta que permita transitar hacia la descarbonización del transporte, esto analizando casos de autos particulares alrededor del mundo y también aplicados al transporte público como en México que funcionen como un referente para la economía circular en el uso de vehículos.

Desarrollo

Reconversión vehicular fundamentos técnicos

La reconversión vehicular, también conocida como *retrofit* eléctrico, es el proceso de transformar un vehículo diseñado originalmente con un motor de combustión interna en uno impulsado por un sistema de propulsión eléctrica (Ayaz y Khan, 2025). Este proceso implica reemplazar componentes clave de un vehículo como, obviamente el motor y todos los elementos que requiere este para funcionar, puede ser que el motor funcione con gasolina o con Diésel, independientemente de eso, elementos como el sistema de escape, el tanque de combustible y la transmisión deben ser remplazados por un motor eléctrico, un paquete de baterías, un controlador electrónico y un sistema de carga para su correcto funcionamiento. A diferencia de la fabricación de vehículos eléctricos nuevos, la reconversión aprovecha la estructura existente del vehículo, como el chasis, la carrocería y los sistemas de suspensión, lo que reduce significativamente el consumo de materiales y energía asociados con la producción de un automóvil desde cero (Ghodrati, 2024).

De acuerdo con Oladosu et al. (2024), la reconversión requiere adaptar el espacio disponible para alojar las baterías, que suelen colocarse en el compartimiento del motor o en el piso del vehículo, y garantizar que el sistema eléctrico sea compatible con los componentes originales, como los frenos y la dirección. Para el correcto funcionamiento de la conversión eléctrica es necesario instalar un sistema de gestión de baterías para optimizar su rendimiento y seguridad, este proceso no solo es aplicable a automóviles particulares, sino también a vehículos comerciales, autobuses e incluso maquinaria industrial, demostrando su versatilidad como solución de movilidad sustentable.

Uno de los principales motivos para impulsar la reconversión vehicular es su impacto positivo en el medio ambiente (Lipu et al., 2021). Dado que los vehículos de combustión interna son una de las mayores fuentes de emisiones contaminantes al ambiente, al convertirlos en eléctricos, se eliminan por completo las emisiones directas durante su operación, con-

tribuyendo a mejorar la calidad del aire en zonas urbanas y reduciendo la huella de carbono del transporte, además de traer una mayor efiencia energética lo que también tiene un impacto en la reducción de costos por combustible. La reconversión promueve la economía circular al extender la vida útil de los vehículos existentes, evitando la necesidad de fabricar unidades nuevas y, por lo tanto, reduciendo la demanda de materias primas (Tiwari, 2023).

A pesar de sus múltiples ventajas, la reconversión vehicular enfrenta varios desafíos que deben superarse para su adopción masiva. Uno de los principales obstáculos es la falta de regulaciones claras en muchos países, lo que dificulta la homologación de vehículos convertidos. En algunas regiones, los requisitos de seguridad son tan estrictos que hacen inviable legalmente la circulación de estos vehículos, a pesar de ser más limpios que sus versiones originales (Gong, 2021).

Otro desafío es la disponibilidad y el costo de las baterías, estas representan hasta el 50% del precio total de una conversión. Aunque los precios de las baterías de litio han disminuido en los últimos años, tecnologías más accesibles, como las de ferrofosfato, aún no están ampliamente disponibles en todos los mercados (Ntombela, 2023). La autonomía de los vehículos reconvertidos suele ser menor que la de los eléctricos nuevos debido a limitaciones de espacio para instalar baterías de mayor capacidad. Sin embargo, avances en densidades energéticas y sistemas de carga rápida están ayudando a mitigar este problema (Dudziak, 2022).

El futuro de la reconversión vehicular es prometedor, especialmente en el contexto de la transición energética global. A medida que más países establecen metas para prohibir los vehículos de combustión interna, la reconversión se posiciona como una solución pragmática para acelerar la descarbonización sin generar residuos masivos de automóviles usados. Empresas especializadas, como Arc Motor Company en Estados Unidos, están demostrando que es posible convertir clásicos y vehículos comerciales en versiones eléctricas de alto rendimiento.

Para impulsar esta tendencia, se necesitan políticas públicas que incentiven la reconversión, como subsidios, exenciones fiscales y programas de capacitación para técnicos. La colaboración entre gobiernos, fabricantes de componentes y universidades también es clave para estandarizar

procesos y reducir costos. En el mediano plazo, la reconversión podría complementar la producción de vehículos eléctricos nuevos, creando un ecosistema de movilidad más sostenible y accesible para todos.

Eficiencia energética de un motor de combustión interna y uno eléctrico

La eficiencia de un motor se define como la relación entre la energía útil que genera movimiento y la energía total que consume ya sea combustible o electricidad. En este aspecto, los motores eléctricos superan ampliamente a los de combustión interna, un motor convencional, ya sea de gasolina o diésel, aprovecha alrededor del 30% de la energía del combustible para mover el vehículo, mientras que el resto se pierde como calor, alrededor del 65% y fricción mecánica cerca de un 5%. Esto se debe a limitaciones termodinámicas inherentes al ciclo Otto o Diésel, donde gran parte de la energía se disipa en la combustión incompleta, el calentamiento del bloque motor y los gases de escape (Joshi, 2022).

Otro de los elementos fundamentales que propician la pérdida de energía en un motor de combustión interna es la necesidad de transmitir el movimiento hacia las ruedas, la transmisión mecánica, el diferencial y los ejes propician que se pierda alrededor de 10% de energía por fricción en ese componente.

Por otro lado, un motor eléctrico convierte entre un 85 y 95% de la energía de la batería en movimiento, gracias a su diseño simplificado, no requiere combustión, tiene menos piezas móviles, sin cigüeñal, válvulas o sistemas de refrigeración complejos, y opera con mínimas pérdidas por fricción. También, los vehículos eléctricos, con los sistemas necesarios, son capaces de recuperar energía durante el "frenado regenerativo", incrementando su eficiencia real hasta un 15% o un 25% adicional en entornos urbanos. Esta diferencia radical explica por qué un vehículo eléctrico consume aproximadamente 3-4 veces menos energía por kilómetro que un vehículo de combustión equivalente (Cao et al., 2021).

Las ventajas de un vehículo con motorización eléctrica son bastantes que eliminan las pérdidas del motor de combustión interna. Principal-

mente, no hay combustión, la energía eléctrica pasa a ser directamente aprovechada como movimiento mediante la inducción de un campo electromagnético. La eficiencia está presente en todo momento, los componentes electrónicos permiten que, ya sea en altas o bajas velocidades, la eficiencia se mantenga en un rango de alrededor de 90%. El frenado regenerativo es otra de las ventajas que permite recuperar energía mediante el aprovechamiento de la energía cinética, cuando el motor deja de ser utilizado para el impulso del vehículo, este se convierte ahora en un generador que inyecta energía eléctrica a la batería.

La eficiencia de los vehículos eléctricos transforma radicalmente el consumo de recursos energéticos. De acuerdo con Zhao et al. (2021), un vehículo eléctrico alimentado con electricidad renovable emite un 70% menos de CO_2 por kilómetro que un vehículo de combustión interna, destacando su potencial para descarbonizar el transporte. Esta ventaja se fundamenta en el menor requerimiento energético, mientras un motor de combustión consume 8-10 kWh de energía química, equivalente a 5-7 litros de gasolina para recorrer 100 km, un vehículo eléctrico solo necesita 15-20 kWh de electricidad, comparable a 2-3 litros de gasolina. Esta diferencia refleja la eficiencia intrínseca de los motores eléctricos, que evitan pérdidas por combustión y aprovechan mejor la energía disponible. Posteriormente se toma un caso que expone esto.

No obstante, el impacto ambiental total de los vehículos eléctricos depende críticamente de la fuente de electricidad. En redes con alta participación de carbón, sus ventajas se moderan, pero incluso en estos casos los eléctricos son 50% más eficientes que los de combustión. También, la flexibilidad de los vehículos eléctricos para integrarse con energías renovables como la solar, y la eólica amplía su potencial sostenible a largo plazo. En contraste, los vehículos de combustión están limitados por la disponibilidad de combustibles fósiles y los crecientes costos ambientales de su extracción y refinamiento. Así, la electrificación no solo optimiza el uso de recursos, sino que también reduce la presión sobre ecosistemas vulnerables vinculados a la explotación petrolera (Verma et al., 2022).

Es importante señalar que la brecha de eficiencia entre motores continuará ampliándose, mientras los motores de combustión interna con tecnologías como el encendido por compresión homogénea podrían alcanzar

eficiencias del 50%, su complejidad y alto costo limitan su adopción masiva; en contraste, los motores eléctricos siguen evolucionando con diseños más avanzados como los síncronos de imanes permanentes y semiconductores de banda ancha, que reducirán sus pérdidas energéticas en otro 10%. Esta divergencia tecnológica responde a principios físicos fundamentales, los motores eléctricos ya operan cerca de su límite teórico de eficiencia del 98%, mientras que los motores de combustión, debido a las inherentes pérdidas por combustión y fricción, difícilmente superarán el 40%, consolidando la electrificación no solo como una solución ambientalmente preferible, sino como la opción técnicamente más viable a largo plazo (Verma et al., 2022).

La superioridad técnica y ambiental de los motores eléctricos sobre los de combustión interna resulta evidente al analizar su eficiencia energética. La perdida de energía por calor, y fricción en un motor de combustión interna vuelve atractiva la idea de adoptar un auto que funciona con motores eléctricos, los cuales utilizan la energía de una manera más eficiente y por tener un menor número de piezas móviles reducen su necesidad de mantenimiento. Esta condición brinda a un auto eléctrico una ventaja que se traduce en un consumo de 3 a 4 veces menor de energía por kilómetro, reduciendo tanto costos operativos como emisiones, especialmente cuando la electricidad proviene de fuentes renovables. Esta brecha, lejos de cerrarse, se ampliará, reforzando la electrificación como el camino inevitable hacia una movilidad verdaderamente eficiente y sustentable. Más allá de las consideraciones ambientales, la transición responde a un imperativo técnico, los motores eléctricos no solo optimizan recursos y protegen ecosistemas, sino que representan el máximo potencial de eficiencia que la física permite, algo que la combustión interna nunca podrá igualar (Farzaneh y Jung, 2023).

Conversión de autos de combustión a eléctricos

Como ya se mencionó previamente, la conversión de los vehículos de combustión a vehículos eléctricos es una estrategia atractiva para la economía circular de un vehículo. En el Instituto Politécnico Nacional se desarrolló

un proyecto en donde la búsqueda de tener un vehículo que emita menos contaminantes y que, además pueda circular todos los días por la Ciudad de México llevó a investigadores de la Escuela Superior de Computo (ESCOM) a suprimir las partes mecánicas de un Ford Focus 2002 en el cual se instalaron los elementos necesarios para como las baterías y el motor eléctrico para convertirlo. El vehículo además cuenta con un cargador inteligente, el cual suministra la energía eléctrica necesaria para que se pueda cargar y que deja de hacerlo una vez que el auto está totalmente cargado. Otro de los argumentos de los participantes del proyecto es brindar a la población que no se encuentra en la posibilidad de adquirir un vehículo eléctrico la opción de convertir su propio auto y de esta manera contribuir con la reducción de emisiones contaminantes.

De acuerdo con Marín (2019), los intereses económicos han sido una de las principales barreras para masificar los autos eléctricos en el mercado, a pesar de que llevan existiendo más de 50 años. El autor propone una metodología de conversión, la cual está sustentada en un modelo de requerimientos de potencia, la cual involucra variables como los grados de la pendiente, la rodadura del vehículo, la aerodinámica y la aceleración. Las pruebas de conversión realizadas en un Suzuki Swift demostraron que primeramente con el motor de combustión el vehículo presenta altos niveles de contaminación que sobre pasan los límites internacionales, con la conversión a eléctrico, estos niveles desaparecen al no emitir gases. También la conversión trajo una reducción de la masa total del vehículo en un 30%, lo que disminuye la demanda energética. El vehículo previamente para recorrer 100 kilómetros necesitaba de 6.5 litros de combustible equivalentes a 7.5 dólares, ahora con la conversión a eléctrico, recorrer esos 100 kilómetros lo puede hacer usando 4000 Wh, equivalentes a 0.68 dólares, lo que representa un ahorro económico y de consumo energético, sin considerar que, para el vehículo, no se requirió fabricar un chasis nuevo ni tampoco partes de interior y la carrocería. En la figura 19.2 expone una imagen tomada del artículo de Marín donde se muestra el vehículo que fue convertido.

Figura 19.2. *Vehículo base de la conversión*

Fuente: Marín (2019).

Considerando aspectos técnicos de la conversión, de acuerdo con Cuadrado Rincón et al. (2023), quienes realizaron un diseño de conversión de un Renault Duster, un vehículo utilitario (SUV) mostrado en la figura 19.3, el diseño de los componentes de acople con la transmisión del vehículo los llevo a determinar que los que mejor cumplen la función son los helicoidales para hacer una reducción de velocidad de 330 Revoluciones Por Minuto (RPM) a 165 RPM. Dando pie a que se debe hacer un ajuste de los elementos de torsión para que no se tengan fallas para el momento en el que el motor eléctrico sea el encargado de enviar la potencia a las ruedas.

Figura 19.3. *Renault Duster vehículo SUV*

Fuente: https://www.renault.com.mx

Hablando ahora sobre los vehículos de transporte público, en la Ciudad de México, la Red de Transporte de Pasajeros en el año 2023 inició con la conversión de su primera unidad de transporte público, la cual representará para la organización un ahorro de alrededor de 50 mil pesos en combustible y gastos de mantenimiento. El proyecto también tiene la finalidad de estudiar el comportamiento de las unidades con y sin pasajeros para determinar variables ambientales y económicas. El director de la RTP mencionó que, para llevarse a cabo se requirió la colaboración con universidades públicas y privadas. El vehículo reconvertido es un Dina Linner, se consideró este por la estrecha relación con la empresa mexicana y por las características de la carrocería y su chasis.

Internacionalmente hablando, en Estados Unidos, una empresa llamada Arc Motor Company se dedica a la conversión de vehículos clásicos de combustión a eléctricos. El concepto surge como una combinación entre la herencia que han dejado los vehículos clásicos americanos y la innovación tecnológica para la propulsión de autos. Literalmente, ellos colocan en su página web, "nosotros electrificamos autos clásicos icónicos". En Arc Motor Company, creen que los autos clásicos merecen una segunda vida: una más limpia, potente y preparada para el futuro. Por eso se especializan en conversiones *premium* a eléctricos, transformando autos clásicos en máquinas de alto rendimiento y cero emisiones, sin perder su esencia.

> Lujo electrificado. Hacemos que la transición a lo eléctrico sea perfectamente sencilla. Nuestro servicio integral se encarga de todo: desde la recogida de tu vehículo hasta la entrega de tu auto recién electrificado. Nos ocupamos de la logística, seguros y transporte, garantizando una experiencia sin complicaciones. Cubrimos cada detalle en todo el proceso. Relájate y déjanos encargarnos de los preparativos mientras tú te alistas para conducir hacia el futuro. Nuestro equipo está formado por ingenieros, mecánicos, diseñadores y otros profesionales con experiencia en empresas de prestigio como Toyota y Rolls Royce. Trabajamos contigo en cada etapa del proceso para garantizar que tu conversión no solo cumpla, sino que supere tus expectativas. (Arc Motor Company, 2026)

Figura 19.4. *Auto clásico siendo convertido en eléctrico*

Fuente: https://arcmotors.com

En la figura 19.4 se muestra una fotografía de las instalaciones del taller de conversiones y su personal.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (2025) menciona que la conversión de autos eléctricos, aunque no es común, es posible convertir un vehículo convencional en un vehículo completamente eléctrico. Estas conversiones ofrecen alternativas que van más allá de las disponibles directamente de los fabricantes de equipo original. Instaladores certificados pueden convertir económicamente vehículos pesados para operar exclusivamente con electricidad o mejorar la eficiencia de diseños vehiculares convencionales. En su página de conversiones mencionan que:

> Una conversión *aftermarket* consiste en la modificación de un vehículo o motor para operar con un combustible o fuente de energía diferente a la original. Los vehículos y motores convencionales fabricados por proveedores de equipo original pueden convertirse para funcionar con combustibles como propano, gas natural o electricidad.

Aunque muchos fabricantes de equipo original ya ofrecen vehículos con combustibles alternativos y tecnologías avanzadas, los modelos, combustibles y tecnologías disponibles varían considerablemente. Estos vehículos se consideran conversiones cuando sus motores de gasolina son modificados para usar combustibles alternativos. Igualmente, los vehículos ya en circulación también pueden convertirse, con opciones que varían según modelo, tipo de combustible y tecnología.

Todas las conversiones de vehículos y motores deben cumplir con:

- Los estándares de emisiones y seguridad de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).
- Las regulaciones de la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Carreteras (NHTSA).
- Los requisitos de agencias estatales como la Junta de Recursos del Aire de California (CARB).

En la sección de electricidad mencionan los siguiente "la electricidad puede alimentar vehículos eléctricos, que incluyen los totalmente eléctricos o de batería y los híbridos enchufables, los cuales cargan sus baterías directamente de la red eléctrica o fuentes externas". A diferencia de estos, los híbridos convencionales usan combustibles líquidos como gasolina, pero aprovechan pequeñas baterías para recuperar energía del frenado mejorando su eficiencia. Los vehículos híbridos enchufables, considerados autos eléctricos por su capacidad de usar electricidad externa, también pueden funcionar con combustible líquido como los vehículos híbridos cuando es necesario, combinando ambas tecnologías.

Actualmente, usar electricidad como fuente de energía para transporte es más rentable que utilizar gasolina, aunque los vehículos eléctricos suelen tener un costo inicial más alto. Sin embargo, este gasto puede compensarse con ahorros en energía, el crédito fiscal federal y los incentivos estatales. La electricidad para cargar los vehículos resulta especialmente económica si los conductores aprovechan tarifas residenciales en horas de bajo consumo u otros beneficios ofrecidos por las compañías eléctricas. El costo depende del precio de la electricidad, que varía según la región, el tipo de generación, el horario de uso y el punto de acceso. No obstante, gracias a

la eficiencia energética de los trenes motrices de los autos eléctricos, se generan ahorros adicionales frente a los vehículos convencionales, incluso cuando las tarifas eléctricas son relativamente altas, por ejemplo, en horas pico o en estaciones de carga rápida pública.

La Unión Europea menciona que, la conversión consiste en reemplazar el motor de combustión por uno eléctrico, lo que extiende la vida útil del vehículo: se conservan los principales elementos estructurales, pero todo el sistema de tracción puede sustituirse por uno eléctrico. Esto evita el costoso reciclaje completo del automóvil, reduciendo así su impacto ambiental. Los aspectos económicos también son clave, expertos de Ennovation Technology estiman que convertir un vehículo de combustión a eléctrico cuesta aproximadamente un 30% del valor de comprar un camión pesado eléctrico nuevo. Además, muchos modelos en el mercado ya han dejado de fabricarse, por lo que cambiar su sistema de propulsión suele ser la única opción para seguir utilizándolos. En la figura 19.5 se muestra una imagen del proceso de conversión de un vehículo de combustión a uno eléctrico utilizado en Francia.

Figura 19.5. *Proceso simplificado de la aprobación regulatoria en Francia*

Fuente: https://www.transportenvironment.org

Considerando los elementos antes mencionados, México puede adoptar las mejores prácticas de conversión vehicular de Estados Unidos y la Unión Europea, comenzando por establecer un marco regulatorio robusto. En la Unión Europea, la regulación 2023 estandarizó los requisitos téc-

nicos y de seguridad para homologar conversiones, mientras que, en Estados Unidos, la EPA y la NHTSA exigen cumplir normas de emisiones y protección contra descargas eléctricas con la Estándar 305. México carece actualmente de una normativa clara, lo que frena la inversión en talleres especializados. Para remediarlo, el país podría establecer junto con las dependencias competentes criterios para certificar instaladores, protocolos de pruebas para baterías y motores, y un proceso simplificado de "re-registro" vehicular, para que pueda ser acreedor a los beneficios fiscales. Un modelo inspirador es California, donde los kits de conversión aprobados por la CARB pueden legalizarse en 30 días. Considerando la importancia del tema, se debería formar un consejo técnico con ingenieros mexicanos para adaptar estos estándares al mercado local, priorizando seguridad y accesibilidad, esta base legal incentivaría a empresas y talleres a ofrecer servicios de calidad, evitando conversiones informales que ponen en riesgo a usuarios.

Otro aprendizaje clave es la implementación de incentivos económicos, que en Estados Unidos. y la Unión Europea han sido clave para masificar el retrofit. Francia subsidia hasta el 40% del costo de conversión, alrededor de €5 000, mientras que California ofrece descuentos de 1 500 a 4 000 dólares a través del programa Clean Vehicle Rebate.

Una de las acciones referentes que está llevando a cabo México es el proyecto Olinia, el cual busca que en México se construya el primer auto eléctrico desde cero, incluyendo el diseño y la manufactura, el proyecto estará enfocado en atender las necesidades de movilidad de barrio, sin embargo, en el tema de la conversión de vehículos aún es necesario un marco sólido que permita considerar esta opción como una alternativa para quienes no puede comprar un vehículo eléctrico nuevo.

Conclusión

La reconversión de vehículos de combustión a eléctricos emerge como una solución estratégica para descarbonizar el transporte, combatiendo las emisiones globales vinculadas a este sector. La evidencia técnica demuestra que esta práctica no solo reduce emisiones directas a cero durante la operación,

sino que también minimiza el impacto ambiental asociado a la fabricación de autos nuevos, aprovechando la mayor eficiencia energética frente a los motores de combustión interna. Casos como el Ford Focus convertido por el IPN en México o los proyectos de Arc Motor Company en Estados Unidos revelan beneficios tangibles como ahorros en costos operativos, autonomías urbanas suficientes, y la preservación de vehículos icónicos bajo principios de economía circular.

Sin embargo, su escalamiento enfrenta desafíos críticos, la falta de marcos regulatorios claros en México frena la homologación segura, mientras que el acceso a baterías asequibles, aunque su costo ha caído un 90% desde 2010, aún representa el 50% del gasto total. Ejemplos como los subsidios franceses o los estándares EPA/NHTSA, destacan la necesidad de políticas públicas integrales: incentivos fiscales, capacitación técnica, y normativas ágiles como las de California.

El transporte público y las flotillas urbanas son oportunidades inmediatas, ejemplos como RTP en Ciudad de México ya prueba esta transición con ahorros por unidad, replicando modelos exitosos como los buses de Lisboa o los *rickshaws* eléctricos de la India. La electrificación de vehículos existentes no es solo una alternativa ambiental, sino una herramienta de justicia social que democratiza la movilidad sustentable. Al adoptar las mejores prácticas globales y adaptarlas a su contexto, México contribuir con estrategias como la de la conversión de vehículos para alcanzar los objetivos globales de la Agenda 2030. El futuro del transporte no está solo en lo nuevo, sino en reinventar lo que ya existe.

Referencias

Ayaz, M. A. y Khan, I. (2025, febrero). Optimizing retrofitting of internal combustion engine vehicles (ICEV) for electric mobility in low-income regions. En *2025 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/tpec63981.2025.10906817

Cao, Z., Mahmoudi, A., Kahourzade, S. y Soong, W. L. (2021, septiembre). An overview of electric motors for electric vehicles. En *2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/aupec52110.2021.9597739

Cuadrado Rincón, A. M., Villar Tapias, J. S. D. y Rincón Díaz, S. A. (2023). *Diseño para la conversión de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos: Renault Duster.*

Dudziak, A., Droździel, P., Stoma, M. y Caban, J. (2022). Market electrification for BEV and PHEV in relation to the level of vehicle autonomy. *Energies, 15*(9), 3120. https://doi.org/10.3390/en15093120

Farzaneh, F. y Jung, S. (2023). Lifecycle carbon footprint comparison between internal combustion engine versus electric transit vehicle: A case study in the US. *Journal of Cleaner Production, 390,* 136111. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136111

Filonchyk, M., Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich, V. y He, Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO_2, CH_4, and N_2O. *Science of the Total Environment,* 173359. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359

Ghodrati, B. (2024). *Circular economy: Retrofitting fossil fuel passenger vehicles to El-hybrid.*

Gong, C., Liu, J., Han, Y., Hu, Y. yu, H. y Zeng, R. (2021). Safety of electric vehicles in crash conditions: A review of hazards to occupants, regulatory activities, and technical support. *IEEE Transactions on Transportation Electrification, 8*(3), 3870-3883. https://doi.org/10.1109/tte.2021.3136126

Hoeft, F. (2021). Internal combustion engine to electric vehicle retrofitting: Potential customer's needs, public perception and business model implications. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 9,* 100330. https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100330

Innocenti, E., Berzi, L., Del Pero, F. y Delogu, M. (2024). Life cycle greenhouse gas emissions of retrofit electrification: Assessment for a real case study. *Results in Engineering, 23,* 102454. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102454

Joshi, A. (2022). Review of vehicle engine efficiency and emissions. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 4*(540), 1704-1733. https://doi.org/10.4271/2022-01-0540

Kumar, H., Bharat, Shukla, A. y Kulkarni, A. R. (2025). Retrofitting of an IC engine vehicle to electric vehicle with cost & performance analysis. En A. Pal, V. Gautam, Q. Murtaza, P. Kumar y R. Sahu (Eds.), *Mechanical Engineering for Sustainable Development: ISME-2024, 49,* 174. https://doi.org/10.21741/9781644903438-18

Lipu, M. S. H., Faisal, M., Ansari, S., Hannan, M. A., Karim, T. F., Ayob, A., ... y Saad, M. H. M. (2021). Review of electric vehicle converter configurations, control schemes and optimizations: Challenges and suggestions. *Electronics, 10*(4), 477. https://doi.org/10.3390/electronics10040477

Lyu, C., Lu, D., Xiong, C., Hu, R., Jin, Y., Wang, J., ... y Lian, L. (2022). Toward a gliding hybrid aerial underwater vehicle: Design, fabrication, and experiments. *Journal of Field Robotics, 39*(5), 543-556. https://doi.org/10.1002/rob.22063

Marín, E. A. S., Londoño, J. F. A. y Piedrahita, C. A. R. (2019). Metodología para la conversión de un vehículo térmico a un vehículo eléctrico. *Avances: Investigación en Ingeniería, 16*(1), 88-100. https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.5064

Ntombela, M., Musasa, K. y Moloi, K. (2023). A comprehensive review for battery elec-

tric vehicles (BEV) drive circuits technology, operations, and challenges. *World Electric Vehicle Journal, 14*(7), 195. https://doi.org/10.3390/wevj14070195

Oladosu, T. L., Pasupuleti, J., Kiong, T. S., Koh, S. P. J. y Yusaf, T. (2024). Energy management strategies, control systems, and artificial intelligence-based algorithms development for hydrogen fuel cell-powered vehicles: A review. *International Journal of Hydrogen Energy, 61,* 1380-1404. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.284

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024, 24 de octubre). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Rapson, D. S. y Muehlegger, E. (2023). The economics of electric vehicles. *Review of Environmental Economics and Policy, 17*(2), 274-294. https://doi.org/10.1086/725484

Taborda, S., Henriques, F., Carvalho, G., Magalhães, L. y Banza, M. (2023). People-centred design methods in a local decision-making process: Masterplan for Lisbon's multimodal mobility hubs. *Transportation Research Procedia, 72,* 900-907. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.500

Tirpude, S., Bharadwaj, A. y Holmukhe, R. M. (2021). Retrofitting of a ultracapacitor/battery hybrid system to an electric-rickshaw for use in India: A case study. En *2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)* (pp. 1-7). IEEE. https://doi.org/10.1109/gcat52182.2021.9587634

Tiwari, N., Verma, P., Kumar, S., Kumar, S., Dutt, H., Ahmad, S. y Chauhan, S. S. (2023). Converting gasoline vehicle into an electric vehicle (EV): A review. *Materials today: Proceedings, 79,* 379-388. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.161

Vargas Romero, D. A. y Durán Grados, C. V. (2024). Ultrafine particles on electric, gas, and diesel buses in the mass transit buses of Bogotá, Colombia. *Transportation Research Record, 2678*(8), 46-56. https://doi.org/10.1177/03611981231213081

Verma, S., Dwivedi, G. y Verma, P. (2022). Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. *Materials Today: Proceedings, 49,* 217-222. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.666

Zhao, J., Xi, X. I., Na, Q. I., Wang, S., Kadry, S. N. y Kumar, P. M. (2021). The technological innovation of hybrid and plug-in electric vehicles for environment carbon pollution control. *Environmental Impact Assessment Review, 86,* 106506. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106506

20. ¿Cómo las políticas públicas pueden impulsar la gestión de residuos domésticos? Un estudio de caso en México*

Héctor Guadalupe Ramírez-Escamilla[1]
María Concepción Martínez-Rodríguez[2]
Diego Domínguez-Solís[3]

DOI: https://doi.org/10.52501/cc.365.20

Resumen

A nivel mundial la problemática entorno a la generación de residuos se agrava más con el creciente aumento de la población mundial, provocando la saturación de rellenos sanitarios. Lo anterior, como una consecuencia de la ausencia de acciones de valorización de residuos y de la permisividad de los marcos regulatorios. El objetivo de la presente investigación es presentar una propuesta de política pública la cual es construida por la información recuperada de la literatura acerca de estos instrumentos en gestión de residuos y además de conjuntar datos sobre la situación del problema en una localidad que servirá como prueba de la situación actual que aqueja a México, además de ser el modelo para la construcción de la propuesta de política pública. Los resultados muestran que la separación selectiva de los residuos aún sigue siendo un problema global y especial en comunidades con carencia de infraestructura y educación. La propuesta de una política pública que implique una participación por parte del productor, el generador y la parte gubernamental, puede crear un vínculo que mejore la recuperación de residuos valorizables y mejorar la eficacia de la recolección y

* Derivado del proyecto de Investigación SIP 20251143 del Instituto Politécnico Nacional.

[1] Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9440-4644

[2] Doctora en Política Pública. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3094-5411

[3] Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8402-5157

gestión de residuos. En conclusión, este estudio proporciona las bases para una propuesta de política pública más sólida y viable, encaminada a superar las barreras existentes, involucrar a todos los actores relevantes y fomentar un modelo de gestión sostenible y circular en el manejo de residuos urbanos.

Palabras clave: *políticas públicas, residuos sólidos urbanos, economía circular, desarrollo sostenible.*

Introducción

El incremento de los residuos domésticos o urbanos es una de las problemáticas mayormente abordadas por países, estados y comunidades. La creciente urbanización, sumada con el aumento de la población, la agravan más y se ven impulsadas por productos y servicios que dificultan la gestión de residuos (Jiang, 2022). A nivel mundial se estima que se generan más de 2 mil millones de toneladas de residuos sólidos urbanos anualmente, siendo responsable de un 20% de emisiones de metano y gas de efecto invernadero, que ocasiona más de 80 veces el calentamiento del planeta que las emisiones de dióxido de carbono (Lama, 2024).

La gestión de los residuos sólidos incide directamente con los dominios de la sostenibilidad, en lo económico, ambiental y social. Por lo que este se enlaza con 12 de los 17 objetivos de desarrollo sustentable (ODS), de ahí la importancia de priorizar la política de gestión de residuos sólidos urbanos (RSU), como el primer paso a la sostenibilidad (Rodić y Wilson, 2017). La gestión de residuos, guiada por la clasificación de residuos, desempeña un papel importante en la reducción de la producción de residuos (Fan et al., 2019) siendo una de las estrategias clave para alcanzar el desarrollo sostenible. Siendo la clasificación el primer reto en la solución de la gestión de residuos, esta etapa involucra un gran número de autores y por ende de responsabilidades compartidas, por lo que en ocasiones la conjunción de estos para crear un eslabón sólido que involucra la gestión integral de residuos de cualquier tipo se vuelve en una lucha de poderes y de distribución de recursos para atacar la situación que envuelve a esta problemática.

La participación pública en la clasificación de residuos se considera una parte esencial para la gestión de residuos (Hu et al., 2021), ya que un cambio de comportamiento de las personas en la separación de los residuos de su hogar puede lograr el efecto previsto de la política ambiental (Dietz et al., 2009). Según la Teoría del Comportamiento Planificado (TPB), las políticas pueden fungir como factores contextuales para modular el comportamiento de las personas (Ajzen, 1991). Por lo tanto, la creación de una política pública junto con su seguimiento de aplicación puede impulsar un mejor desempeño en la recuperación de materiales con potencial de reutilización o reciclaje de las ciudades que actualmente han implementado políticas de clasificación de residuos.

En esta investigación, se describe e identifica la función que tendría la creación y aplicación de una política de retorno de "residuos" para las grandes cadenas de producción, que en cumplimiento de sus servicios, proveen productos que pasado su tiempo de utilidad podrían ser recuperadas por el proveedor originario, con el fin de conseguir una conjunción entre las políticas de clasificación y separación de residuos existentes para los ciudadanos, y la parte del sector público-privado, a fin de conseguir un objetivo en común como lo es la reducción de residuos, emisiones y conseguir el cumplimiento de los ODS.

Revisión de literatura

Responsabilidad compartida

La producción de un producto involucra un número de determinado de materias primas para su fabricación y en ocasiones, las materias primas pueden emplearse únicamente para la creación de un envase para contener el verdadero producto principal, sin embargo, en algunos casos es imposible evitar su creación, como lo es el caso de los distintos líquidos, sólidos o gases que se ponen a la disposición del consumidor.

Por otra parte, el hecho de que el consumidor pague por el producto que se encuentre dentro de un envase, recae en él la responsabilidad de tener un manejo adecuado de su residuo. Es aquí donde se puede notar

una evasión de la responsabilidad del productor por proveer de un servicio a sus consumidores con el objetivo de facilitar el manejo de sus productos al final de su ciclo de vida.

Si bien existen programas de recolección de ciertos tipos de residuos, el compromiso del productor con los residuos que generaran sus productos debe llevarse acabo de una forma responsable, este principio es lo que llamamos responsabilidad compartida. Es un término aplicado en la mayoría de las legislaciones que involucran gestión de residuos, definiéndose como: Principio que reconoce que los desechos generados a partir de actividades que satisfacen las necesidades de la sociedad requieren un manejo integral, basado en la colaboración entre productores, consumidores y gobiernos (Cortinas, s/f). Esta definición marca los actores involucrados para llevar a cabo esta labor, por lo que si existe en legislaciones debería ser aplicable y asignar labores a cada uno, tales como; el productor debe mejorar el diseño de productos sostenibles, gestionar su recuperación o ciclo de vida; los consumidores deben adoptar prácticas responsables de uso y disposición; y los gobiernos implementan políticas y supervisan su cumplimiento para garantizar la sostenibilidad del sistema.

Responsabilidad extendida del productor

La responsabilidad ampliada del productor (REP) implica reducir el impacto ambiental que ocasiona un residuo, a través de que los productores de un producto asuman la responsabilidad de estos a lo largo de todo el ciclo de vida, además de recuperar, reciclar y eliminar el producto (Nnorom y Odeyingbo, 2020).

Esta estrategia tiene un mayor peso en la toma de decisiones sobre el productor y busca que mejore su diseño y marketing. Además, la REP carga a la industria productora los costes de gestión de los residuos posconsumo, se basa en el principio de "quien contamina paga" por lo que carga la responsabilidad del reciclaje y recuperación de materiales (Kosior y Crescenzi, 2020). Es así como surge un área de oportunidad de mejora para que la industria pueda diseñar productos con mayor facilidad de reutilización y reciclabilidad. La REP se vuelve más que una opción una política de

gestión de residuos que guíe hacia una gestión integral de los residuos, con la aplicación de programas implementados por los propietarios de las marcas (Gupta, 2023; Biron, 2020). También existe la opción de que el productor opte por delegar su responsabilidad de manejo hacia un tercero, es decir, el productor paga por la gestión del producto usado (Gaur et al., 2022).

Políticas públicas

Las políticas gubernamentales son el eslabón principal para la integración del desarrollo sostenible y para poder alcanzar la sostenibilidad ambiental, el gobierno tiene en parte una responsabilidad por proteger o asegurar un medio ambiente apropiado para sus ciudadanos. Es bajo este esquema que se prescriben las políticas sobre manejo de residuos. Es así como, la política pública es el resultado de un proceso orientado a diseñar e implementar leyes, decretos, reglamentos y acciones gubernamentales con el objetivo de incidir en la sociedad, generando cambios sociales y resultados tangibles que reflejan las decisiones tomadas dentro del sistema político (Paton, 2008).

Según Lee et al. (2013) el proceso de formulación y modificación de políticas públicas involucra las siguientes etapas:

1. Identificación y definición del problema
2. Formulación de políticas
3. Adopción de políticas
4. Implementación de políticas
5. Evaluación y mantenimiento de políticas

En el mundo existe una diversidad de políticas cuya base se da en acuerdos internacionales, en cuestión de gestión de residuos, existen distintas normas, políticas y leyes que fomentar prácticas como la recuperación, reutilización, reciclaje, reducción, etc. Sin embargo, algunas de estas acciones requieren de fondos públicos, es decir, inversiones o exenciones fiscales, aunque hay otras que no requieren como lo son las sanciones y regulaciones, y ambas pueden tener buenos resultados a la hora de su implementación (Murakami et al., 2015).

Políticas públicas en gestión de residuos

En esta sección, se delinea los aspectos más relevantes en la construcción de políticas públicas de los casos de estudios revisados, profundizando en su aplicación práctica, alcance y propósito. Basados en una revisión sistemática, estos hallazgos proporcionan una visión completa de la efectividad de la puesta en marcha de políticas públicas en la gestión de residuos, específicamente los residuos sólidos urbanos y domésticos.

A través de este análisis, se pretende cerrar el vacío existente en la literatura sobre las barreras previamente identificadas en relación con la efectividad de aplicar políticas públicas como opción para la gestión de residuos. Además, se busca discutir cómo adecuar la propuesta y futura implementación de una política pública sobre el retorno de residuos, basada en la responsabilidad extendida del productor. Al analizar las carencias que otros autores han identificado durante la aplicación de políticas públicas, esta propuesta representará una ventaja para su desarrollo y viabilidad.

En la tabla 20.1 se recopilan los 20 artículos seleccionados en esta revisión, resumiendo sus contribuciones. La información recuperada involucra: fuente de donde se recuperó la información, el país de desarrollo de la investigación, el objetivo, el método, los resultados y el tipo de residuo al que se aplica la política pública en dicho estudio. Esta información resultara relevante, al momento de considerar aspectos que puedan replicarse o no en la construcción de la propuesta de política pública.

Contexto geográfico

La importancia del contexto geográfico en la investigación acerca de las políticas públicas aplicadas a la gestión de residuos se realiza con la finalidad de poder conocer tres puntos relevantes; el primero, cual es el país que destaca como pionero en la creación de este tipo de instrumentos, dos conocer cuáles son sus características en aspectos económicos, culturales, educativos, entre otros, que son fundamentales en el éxito de una política pública, y finalmente conjuntar los dos anteriores y conocer que tan viable podría ser replicar ciertos aspectos abordados en las políticas públicas ana-

Tabla 20.1. *Resumen de la información de los artículos seleccionados en la revisión sistemática*

Fuente	***País***	***Objetivo***	***Método***	***Resultados***	***Caso aplicado a:***
(Henao-Rodríguez et al., 2024)	Colombia	Explorar los factores que inciden en la conciencia ambiental y las prácticas de gestión de residuos sólidos	Datos de Encuesta de Cultura Ambiental 2021 y análisis de regresión logística regularizada	Información significativa sobre los comportamientos de separación de residuo	Residuos domésticos
(Hu et al., 2024)	Japón	Investigar los factores que influyen en el comportamiento de separación de residuos	Teoría del comportamiento planificado al incluir normas personales, conocimientos sobre la clasificación de plásticos y políticas gubernamentales	Las personas que viven en municipios con políticas de separación obligatorias tenían más probabilidades de participar en la separación	Residuos Plásticos
(Xu et al., 2023)	Australia	Investigar cómo una variedad de políticas públicas influye en la generación de residuos	Modelo de regresión lineal de efectos fijos con perturbaciones autorregresivas	Las campañas de educación sobre el desperdicio de alimentos y el reciclaje por sí solas no tenían una asociación significativa con la reducción de los residuos o el aumento del reciclaje.	Residuos domésticos
(Zhang et al., 2023)	China	Identificar las barreras de implementación, cómo interactúan y cómo se pueden superar la problemática de gestión de residuos	Interrelaciones entre las barreras utilizando el método de laboratorio de prueba y evaluación de toma de decisiones difusa (Fuzzy DEMATEL)	La "planificación apresurada e inapropiada" y la "falta de apoyo político a nivel de base", dos nuevas barreras.	Residuos domésticos
(Li et al., 2023)	China	Proponer una política obligatoria como una combinación de cinco atributos, es decir, sanción económica, sanción social, supervisión, cobro y gobernanza comunitaria, y realizamos un experimento de elección de políticas	Este estudio lleva a cabo un experimento entre sujetos en Shanghái.	La política obligatoria tiene un efecto de interacción con las políticas auxiliares; específicamente, la gobernanza comunitaria y la supervisión	Residuos domésticos

(Acevedo Correa et al., 2023)	Colombia	Describir la gestión de los residuos alimentarios desde la política pública colombiana	Investigación documental.	Desconocimiento general de la sociedad sobre la problemática, la escasa inversión y la precaria infraestructura, la implementación de estas políticas se está convirtiendo en una lucha cuesta arriba para el país	Residuos alimentarios
(Di Fiore et al., 2022)	Brasil	Conocer la aceptación entre los actores urbanos y la sociedad civil en la implementación exitosa de la nueva regulación de residuos orgánicos	Se realizaron 37 entrevistas cualitativas con actores locales para determinar los factores clave que influyen en la aceptación	La falta de infraestructura y de inversiones en la ciudad podría obstaculizar la eficacia de la ley	Residuos orgánicos
(Jiang, 2022)	China	Analizar las políticas de separación de residuos	Análisis de implementación de políticas de separación de residuos domésticos en Shanghái, Tokio y Taipéi utilizando el Modelo de Proceso de Implementación de Políticas	Shanghái suele utilizar una estrategia obligatoria, Tokio utiliza una estrategia impulsada por los beneficios y Taipéi utiliza un enfoque de intervención administrativa	Residuos domésticos
(Muthová et al., 2022)	Eslovaquia	Descubrir las actitudes de los ciudadanos hacia los problemas en el mantenimiento de espacios públicos y la gestión de residuos causados por el comportamiento humano	Investigación documental y cualitativa de la intervención conductual	Razones que pueden contribuir a aumentar el nivel de participación ciudadana en la separación de residuos: el lugar donde se implementa (factor de afecto), el atractivo (factor de silencio) y el compromiso de las personas	Residuos domésticos
(Chen et al., 2022)	China	Explorar la eficacia de la política desde la perspectiva de la respuesta pública	Tecnología de minería de big data, para recuperar la actitud relacionada con la política de separación obligatoria de residuos en China	La publicación de políticas debe ajustarse al tiempo y las condiciones locales y el gobierno podría formular políticas diferenciadas para guiar a los grupos heterogéneos	Residuos domésticos

(Zhang et al., 2022)	China	Explorar los determinantes de la intención y el comportamiento de separación de los residentes urbanos chinos.	Se realizó un estudio de caso basado en cuestionarios en Shenzhen (en el sur de China) y Tianjin	Proporcionó algunas recomendaciones útiles para que los gobiernos mejoren la eficiencia de la promoción de la separación en origen de los RSU	Residuos domésticos
(Wang, 2021)	China	Conocimiento completo de cómo los sentimientos, la intención de comportamiento, el control percibido del comportamiento y las circunstancias contextuales influyeron en su comportamiento general.	Teoría del comportamiento planificado para analizar las prácticas de separación de residuos	La efectividad percibida de la política promueve la transformación de la intención de iniciación en comportamientos de separación de residuos	Residuos domésticos
(Lishan et al., 2021)	China	Identificar las interdependencias entre las diferentes partes interesadas y mejorar sus interacciones dentro del sistema	Comparación de la participación de los residentes antes y después de la nueva política de separación de residuos	Las relaciones ecológicas entre las partes interesadas eran principalmente explotadoras y competitivas, lo que puede causar una posible ineficiencia	Residuos domésticos
(Zambrano-Monserrate et al., 2020)	Ecuador	Analizar el comportamiento de los hogares en Ecuador respecto a la separación de residuos orgánicos e inorgánicos.	Estudiar tanto a la población urbana como a la rural	El nivel de educación y el acceso a Internet son determinantes del comportamiento de los hogares	Residuos domésticos
(Wojtarowski Leal et al., 2019)	México	Examinar las actitudes de los habitantes de Coatepec sobre el cambio de comportamiento ambiental relacionado con las políticas públicas	Se aplicó una escala Likert a 108 individuos, con preguntas asociadas a actitudes	Los participantes están altamente motivados para separar los residuos y contribuir en el proceso de transformación	Residuos domésticos
(Wang et al., 2019)	China	Examinar cómo la publicidad de la información sobre la separación de residuos afecta la intención de separación	Cuestionario para recopilar los datos de la investigación, y los datos se analizaron utilizando la técnica de modelado de ecuaciones estructurales	La norma personal está positivamente asociada con la intención de separación de residuos del residente	Residuos domésticos

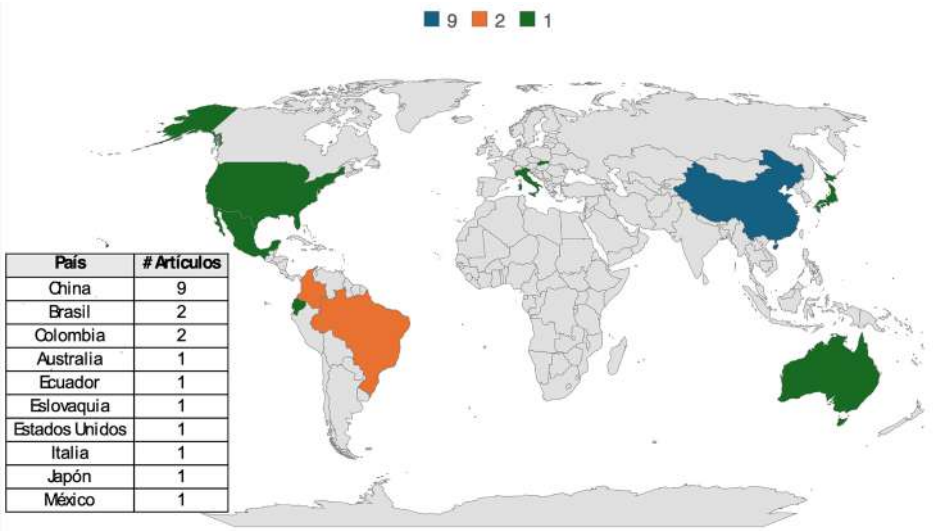
(Jaunich et al., 2019)	Estados Unidos	Evaluar el costo y las implicaciones ambientales seleccionadas de las políticas de gestión de residuos	Conjunto de datos y escenarios específicos que incluía combinaciones de una instalación de recuperación	La utilización de la MRF de residuos mixtos fue sensible a la eficiencia de la separación de materiales y el costo operativo.	Residuos domésticos
(Bellini y Bonoli, 2017)	Italia	Investigar los efectos de la reducción de residuos sin clasificar en términos de factores climáticos y balance energético.	Evaluar el balance energético neto de diferentes sistemas de gestión de residuos.	Los residuos sin clasificar se redujeron recientemente en un 30% gracias a un impuesto específico sobre los residuos y políticas para promover la separación y reutilización de residuos	Residuos domésticos
(Guo et al., 2017)	China	Proporcionar implicaciones políticas más valiosas para otras regiones chinas con más residentes minoritarios	Cuestionario para comprender la conciencia y el desempeño del público, así como el progreso relacionado	Los residentes aún se enfrentaban a la incertidumbre de la responsabilidad y la falta de conocimiento para la separación de desechos	Residuos domésticos
(Nascimento et al., 2015)	Brasil	Abordar algunos aspectos de los RSU en Brasil, considerando algunos cambios que se espera que ocurran en el sector público	Análisis de la información asociada a la Política Nacional de Residuos Sólidos	Hubo mejoras en la gestión de los RSU, éstas fueron insuficientes para hacer frente a los cambios propuestos por el Plan Nacional de Manejo de Residuos Sólidos	Residuos domésticos

Fuente: elaboración propia.

lizadas. La figura 20.1 ofrece un panorama claro de la contribución por país en este campo de estudio, permitiendo reconocer algunos de los países clave en la construcción y aplicación de estos instrumentos.

Con esta información, es posible reconocer la carencia de políticas públicas en gestión de residuos en México, es ahí la relevancia de la presente propuesta en esta investigación.

Figura 20.1. *Mapa de productividad por país en estudios de políticas públicas aplicadas en la gestión de residuos*



País	# Artículos
China	9
Brasil	2
Colombia	2
Australia	1
Ecuador	1
Eslovaquia	1
Estados Unidos	1
Italia	1
Japón	1
México	1

Fuente: elaboración propia.

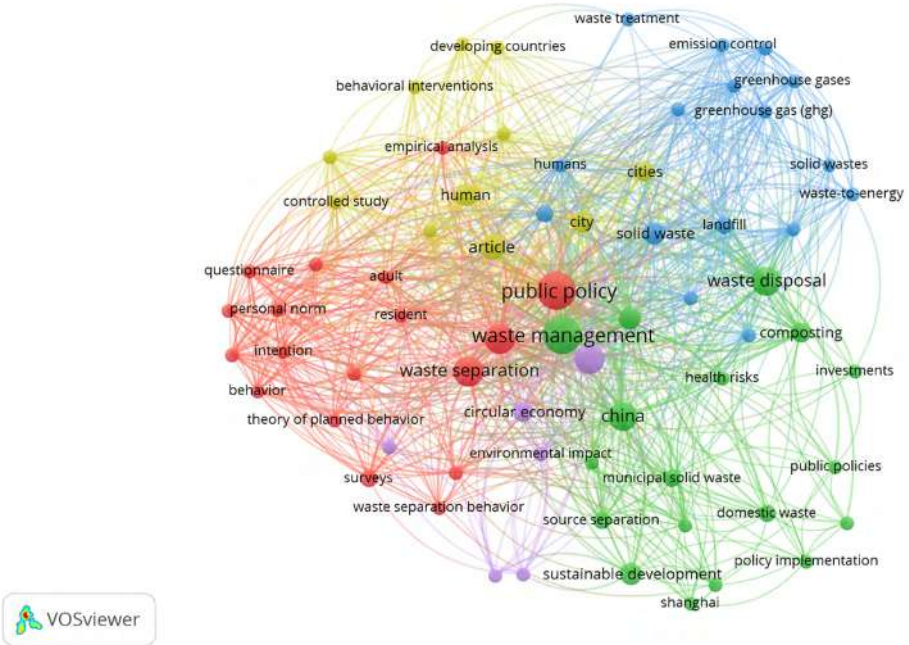
Aplicabilidad de políticas públicas en gestión de residuos

Para la identificación de la aplicabilidad de los estudios recuperados sobre políticas públicas en la gestión de residuos urbanos, se empleó un mapa de coocurrencia de palabras clave (figura 20.2) que ilustra la interconexión de temas dentro de la investigación sobre políticas públicas y gestión de residuos.

El análisis identifica cinco grupos principales que representan áreas de enfoque en los estudios compilados, siendo los tres siguientes los que nos permiten una interpretación sobre el enfoque de las distintas investigaciones. El clúster rojo, que representa el más denso, simboliza las políticas públicas, vinculado a la separación, destacando cómo estos conceptos se entrelazan con el manejo de residuos y esto a su vez con estrategias como el reciclaje.

El segundo clúster, centrado en el manejo de residuos, muestra que este es el campo de aplicación donde se implementan las políticas ambien-

Figura 20.2. *Mapa de coocurrencia de palabras clave de los artículos revisados*



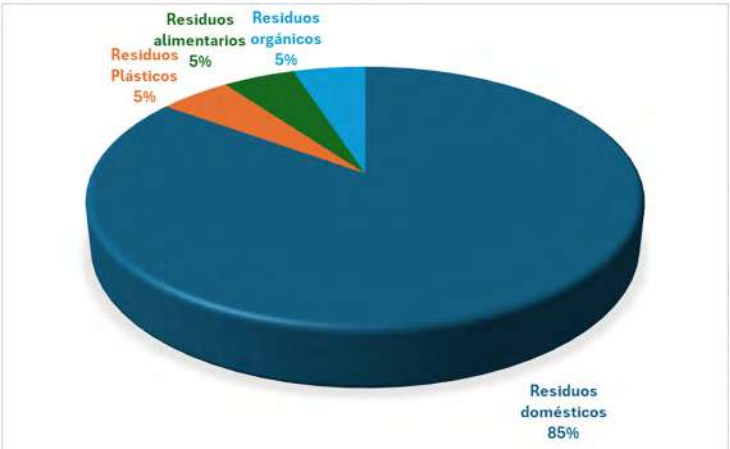
Fuente: elaboración propia mediante VOSviewer.

tales y políticas públicas, cuyo objetivo es prevenir los riesgos a la salud que involucra el manejo inapropiado de residuos, esto a su vez se relaciona con las estrategias de economía circular como una opción de solución en la gestión de residuos.

Por último, el tercer clúster que engloba los residuos sólidos pone de manifiesto las consecuencias entorno a esto como lo son las emisiones de gases de efecto invernadero, implicaciones políticas y gobierno local.

Por otro lado, se analizó el enfoque y la aplicación a la que se dirige las distintas políticas públicas, reconociendo que el 85% de los estudios se aplica a los residuos domésticos, esto principalmente a que es una problemática que engloba dentro de estos otros residuos, y atendiendo la problemática de la falta de separación identificada, puede la solución al manejo de otros residuos como plásticos, alimentos y la fracción orgánica.

Figura 20.3. *Enfoque de las políticas públicas en los artículos revisados*



Fuente: elaboración propia.

Metodología

Para la construcción de la propuesta de política pública que pueda adoptarse en pequeños municipios con densidad poblacional de menos de 30 mil habitantes, ya que son zonas en las que la regulación de acciones y aplicación de medidas pueden permitir conocer el grado de aceptación y monitorear el seguimiento como paso previo a la aplicación a gran escala en ciudades. Por lo que, la presente investigación consiste, una vez presentada, la revisión de la literatura, con el diseño y recuperación de datos relevantes sobre el manejo de residuos, tomando como área de estudio el municipio de Chiconcuac, Estado de México, México.

Diseño del cuestionario y recolección de datos

Para recuperar información y construir la propuesta de política pública en comunidades urbanas, se requirió de conocer aspectos como: determinantes que promueven o dificultan la intención y el comportamiento de separación de residuos, en este estudio se diseñó un cuestionario basado en

investigaciones de la literatura. Se definieron cuatro etapas dentro de la aplicación del cuestionario. Primero, se realiza una introducción con el objetivo de informar a los residentes sobre el propósito y el contenido de este cuestionario, señalando que los datos se utilizarán solo para investigación académica sin filtrar la privacidad. La segunda etapa, fue investigar la intención y el comportamiento de los residentes sobre la separación de residuos a través de preguntas, por ejemplo; ¿Clasifica los residuos sólidos domésticos en su vida diaria?. La tercera parte es el contenido central del cuestionario. Con este instrumento se busca conocer actitudes personales, normas personales, instalaciones separadas, políticas gubernamentales y métodos de incentivos. La última etapa ofrece una investigación demográfica que cubre cinco aspectos que incluyen género, edad y nivel educativo. Como caso de estudio, para la aplicación del cuestionario, se realizó en el municipio de Chiconcuac, ubicado en el Estado de México, México, ya que este municipio cuenta con las características que el mismo Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) considera para clasificar a un municipio o zona como rural o urbana, en este caso Chiconcuac cuenta con 27 692 personas (Gobierno de México, 2022; INEGI, 2020). Para la realización del ejercicio, se aplicó únicamente un total 379 cuestionarios, dato que fue calculado a partir de la ecuación de población finita, para un nivel de confianza del 95% y 50% de probabilidad de éxito.

Resultados

Datos recuperados

El análisis estadístico descriptivo realizado después de ordenar los datos del cuestionario recopilados y la característica demográfica de los encuestados se muestra en la tabla 20.2. La edad de las personas que se encuestaron se encuentra en un 35.4% entre 41 a 50 años, seguido por personas de 20 a 30 años en un 27.7% y de 31 a 40 años en un 21.9%. La mayoría de los encuestados 53.6% fue a la escuela secundaria, el 43.8% fue a la escuela primaria y el 2.6% restante tiene un grado de la licenciatura.

Tabla 20.2 *Características demográficas*

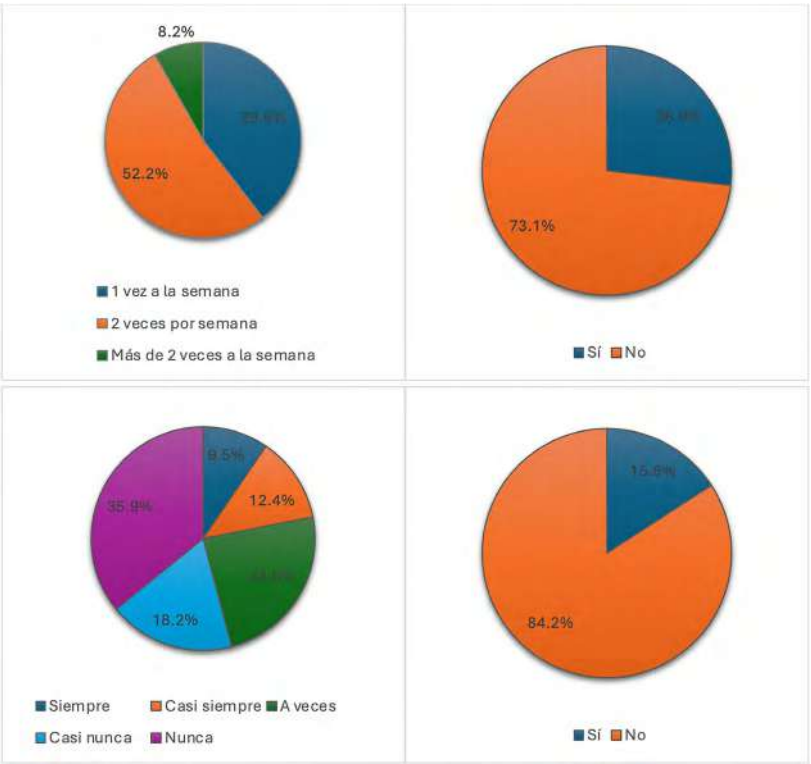
Características demográficas	*Respuestas*	*Frecuencia*	*Porcentaje*
Género	Masculino	166	43.8%
	Femenino	213	56.2%
Edad	20-30	105	27.7%
	31-40	83	21.9%
	41-50	134	35.4%
	51-60	48	12.7%
	Más de 61	9	2.4%
Nivel de educación	Primaria	166	43.8%
	Secundaria	203	53.6%
	Licenciatura	10	2.6%

Fuente: elaboración propia.

Del cuestionario aplicado fue posible visualizar la situación que aqueja a localidades con las características del municipio de Chiconcuac, el cual puede replicarse a lo largo de todo el país, a continuación, se muestra resultados que ilustran variables como el servicio de recolección, la participación en la separación de residuos, la recuperación y el conocimiento de regulaciones.

Como se puede observar en los gráficos anteriores, la frecuencia de recolección de residuos por parte del servicio municipal consiste en dos veces a la semana, igual cabe destacar que los mismos encuestados mencionan que solo se cuentan con 3 camiones recolectores, lo cual coincide con la información que el ayuntamiento proporciona al respecto, por lo que, para atender la demanda de 27 000 personas puede reflejarse como un obstáculo. Por otra parte, los encuestados mencionan que no conocen la separación básica de residuos que, si bien realizan en ocasiones la separación de plástico y cartón, que es lo que ellos consideran como de mayor valor por su compra, en ocasiones les cuesta más juntarlo, almacenarlo en sus lugares y llevarlo a los sitios donde lo compran, por lo que prefieren mejor disponerlo en el servicio de recolección y que sean ellos los encargados de la separación. Por último, mencionan que no conocen de normas o campañas que el municipio realice para sancionar o asesorar a las personas que disponen de forma incorrecta sus residuos en el municipio, tal como lo

Figura 20.4. *A) Frecuencia del servicio de recolección, B) Conocimiento sobre la separación básica de residuos, C) Recuperación de residuos reutilizables o reciclables, D) Conocimiento de normas o campañas municipales para mejorar la gestión de residuos*



Fuente: elaboración propia.

mencionaban algunos de los encuestados que si se requiere de dar a conocer reglas o normas para prevenir que las calles se inunden de residuos.

Toda esta información permite hacer un diagnóstico, de las condiciones en las que pueden encontrarse no solo la localidad de Chiconcuac, sino también otras localidades que pueden sufrir de las mismas condiciones, es ahí donde este caso de estudio puede fungir como la base para la creación de una propuesta de política pública, posteriormente la puesta en acción y el seguimiento, a través de la continuidad de esta investigación. Es por lo anterior, que se comenzará por desarrollar una propuesta que se adecue a las condiciones del municipio de Chiconcuac.

Propuesta de política pública *(policy memo)*

Para la construcción de la propuesta de política pública, los datos anteriores son fundamentales para la construcción de antecedentes y poder marcar la pauta acerca del enfoque que se busca, cabe señalar que el enfoque que se busca dar a la propuesta de política pública es incluir la participación de la población, involucramiento de la parte gubernamental (este caso el municipio) e incluir una parte sobre el papel del productor ya que en ocasiones su función dentro de la gestión puede pasar desapercibida, por lo que esta propuesta irá con un enfoque a la responsabilidad extendida del productor. Para esto, se ocupó los elementos básicos que debe contener un memorando de política *(policy memo)* para el diseño de una política pública, los cuales son:

1. Encabezado
2. Resumen ejecutivo
3. Antecedentes
4. Análisis del problema

A continuación, se lleva a cabo la descripción de cada una de las etapas.

1. Encabezado

Propuesta de política pública de responsabilidad extendida del productor (REP) para el retorno y reutilización de residuos

Fecha: 02/12/2024

De: Héctor Guadalupe Ramírez-Escamilla, María Concepción Martínez-Rodríguez y Diego Domínguez Solís

Para: Tomadores de decisión en materia ambiental

Objetivo: Reconocer las responsabilidades del productor, población y gobierno sobre los residuos que implica la gestión de un residuo hasta el final de ciclo de vida, con el propósito de que exista un compromiso de recuperación de materiales y su reinserción nuevamente en la cadena de valor.

2. Resumen ejecutivo

El incremento y acumulación de residuos provenientes de productos industriales, sumados al consumo en cubrimiento de la demanda de la población representa un desafío crítico para la sostenibilidad ambiental y el aprovechamiento eficiente de recursos. En México, según información del inventario nacional de residuos, en 2017 la generación de residuos a nivel nacional fue de 44.6 millones de toneladas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019), de los cuales el 51.6% eran residuos orgánicos, 14.2% papel, cartón y 11% plásticos, lo cual puede ser lógico en estos últimos ya que la mayoría de las producciones industriales implican un uso excesivo de materiales de un solo uso que principalmente son cajas y cubiertas de cartón, además de envases plásticos. Si bien algunos de estos materiales son recuperados por terceros y reciclados, en México se tiene una estimación de que solo se recicla un 9.6% de lo generado (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019). Por lo que, es indispensable la promoción de en primer lugar de la separación selectiva, la recolección selectiva, la recuperación y el reciclaje de materiales o incluso la reutilización en el mejor de los casos.

Así es como se propone que una política pública que conjunte los principios de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y Responsabilidad compartida, para de esta forma en primer lugar incentivar el retorno al productor de envases y empaques considerados como residuos, esto a través de campañas de recuperación, esto puede mitigar la creación de nuevos envases e incluso evitar costos de reciclaje, permitiendo su reinserción en la cadena de valor, en este memorando se busca incidir en un marco regulatorio que haga conciencia de la importancia de la REP en sectores clave, como el textil, el electrónico y los envases plásticos, para de esta forma reducir los residuos e impulsar economías circulares. En segundo lugar, para alcanzar lo anterior se requerirá de la participación de la población para llevar a cabo la separación y disposición en espacios específicos que permitan la continuidad de la idea de recuperación de materiales.

Como recomendación principal se establece una política pública que combine incentivos económicos, regulaciones claras y sistemas de recolección accesibles para asegurar el retorno de residuos a los productores.

3. Antecedentes

Con los datos del apartado anterior y los resultados obtenidos del estudio de caso realizado en el municipio, se comprueba que el porcentaje de recuperación de materiales por reciclaje o reutilización es mínimo en comparación con la cantidad que se genera. La disposición final en vertederos o incineradores es la opción predominante para el manejo de estos residuos, lo cual representa graves implicaciones ambientales y económicas.

Algunas de las causas son la falta de incentivos para que los productores asuman la gestión del fin de vida de sus productos, la infraestructura limitada para la recolección y clasificación de residuos, el desconocimiento de los consumidores sobre el impacto de sus desechos y su escasa participación en la identificación y separación de materiales para su recuperación. Todo lo anterior conlleva a que la acumulación de residuos genere contaminación, pérdida de recursos valiosos y costos elevados para los gobiernos locales.

En cuanto a las políticas, existen normativas específicas para residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos. Si bien estas normas estructuran recomendaciones para el manejo y control de los residuos, parecen ser ignoradas o no seguidas en su totalidad. Por ello, se busca una mejora a través de la reestructuración de dichas normativas. En muchos casos, la mayor responsabilidad recae sobre el generador, quien, debido a su escaso conocimiento sobre cómo manejar sus residuos, opta por mezclarlos y disponerlos en el servicio de recolección. Incluso en los casos en los que se realiza la separación selectiva, el servicio de recolección suele ser ineficiente, ya que mezcla fracciones orgánicas e inorgánicas, lo que termina por entorpecer el primer paso en la gestión de residuos.

4. Análisis del problema

La gestión de residuos es una problemática que afecta a gran parte del país, ocasionada en parte por la falta de medios para valorizar los residuos antes de disponerlos en los camiones recolectores. Este problema no distingue clases sociales, ya que la producción constante y la carencia de opciones de manejo provocan la pérdida de materias primas y espacios geográficos, así como desigualdad social. Existen personas (pepenadores) que basan sus ingresos en la recuperación y venta de materiales reciclables; sin embargo,

este sector suele ser vulnerable y carece de condiciones de salubridad. Por lo tanto, una política pública en este ámbito podría aprovechar la labor de este sector informal, integrándolo en un equipo de trabajo formal encargado de la recuperación de materiales aprovechables.

Por otro lado, gestionar los residuos implica un gasto económico, el cual está ligado a la carga por camión recolector y al transporte hacia el sitio de recuperación o disposición final. Por ejemplo, según datos de la Ciudad de México, llevar residuos a un relleno sanitario ubicado en el Estado de México cuesta a los ciudadanos aproximadamente $360 por tonelada (Sedema, 2016). Este monto podría ser destinado a otras actividades prioritarias.

Así, la propuesta de política pública podría, entre otros beneficios potenciales, reducir el volumen de residuos, crear nuevas cadenas de valor a través del reciclaje y reutilización, y disminuir los costos públicos en la gestión de residuos.

Entre los desafíos que podrían surgir al momento de su implementación se encuentran la resistencia inicial por parte de la industria debido a costos adicionales y la necesidad de infraestructura adecuada para la logística inversa.

Discusión

Este análisis pretende ofrecer una perspectiva renovada y completa sobre las políticas públicas de manejo de residuos, y enfocarse en reconocer las fortalezas y barreras que se presentan al momento de su ejecución, por lo que, la revisión previa de estudios permite reconocer lo anterior y proponer adecuaciones en la propuesta de política pública planteada.

Con la revisión de la literatura se encontró que estudios como los de Ortiz Castro y Contreras Rivera (2023) encontraron que el enfoque de las normativas legales las cuales analizan desde la factibilidad económica, las inversiones en tecnologías, las limitaciones en cuestión de participación. Otro estudio como el de Acevedo Correa et al. (2023) describe las políticas públicas para la gestión de residuos alimentarios, reconociendo que existe una problemática en el reciclaje de estos residuos, destacando que existe

un listado de estrategias que pueden ser aplicables para la solución de los residuos, como lo es la donación de alimentos y cambios en el comportamiento del consumidor, además de señalar que existe una responsabilidad por parte del productor ya que debe asegurar la porción necesaria para evitar el menor desperdicio posible, siendo una situación muy cuestionable dentro de la normativa colombiana ya que si bien se especifica carece de rigurosidad.

Por otra parte, se reconoció que las políticas públicas en materia de manejo de residuos urbanos presentan varias tendencias clave. En primer lugar, se destaca la relevancia del reciclaje y la reutilización como las estrategias más aplicadas, especialmente en las regiones desarrolladas. Sin embargo, persisten limitaciones en cuanto a tecnologías, comportamiento, iniciativas políticas e implementación. Además, surge la necesidad de asignar claramente las responsabilidades sobre el manejo de los residuos generados a diario por el consumo.

A continuación, se presenta la discusión de los hallazgos encontrados tanto de los estudios recuperados como del trabajo realizado en campo que sirve como marco de referencia para la construcción de una propuesta que se alinea a las necesidades de una situación real, de los cuales nos enfocamos en identificar las pautas en la evaluación de políticas públicas, la presencia de alguna barrera y discutir acerca de cómo se podría conseguir vencer estas limitaciones.

Dentro de las investigaciones se identificaron aspectos fundamentales para el éxito de una política pública de manejo de residuos urbanos. Estos son: el papel del productor, el comportamiento y la participación del consumidor, la planificación de las políticas y la obligatoriedad.

El papel del productor se analiza desde distintas aristas, como el diseño del producto. Algunos productos están diseñados para ser reaprovechados como materia prima, mientras que la mayoría consisten en envases o envolturas de un solo uso que no suelen ser recuperados (Wang, 2021; Lishan et al., 2021; Nascimento et al., 2015). En este sentido, surge el concepto de diseño ecológico, que involucra la aplicación de materiales que faciliten su recuperación una vez concluido el ciclo de vida del producto. En ocasiones, la recuperación de envases puede realizarse por un tercero, es decir, algún prestador de servicio. Sin embargo, en algunos casos, el

producto conserva su funcionalidad original, como cuando las botellas de PET se utilizan para producir nuevas botellas.

En otros casos, el residuo pasa a ser materia prima o insumo para otro producto, desviándose de su ciclo de originalidad. Por ejemplo, cuando las botellas de PET se utilizan como combustible para hornos, aunque este enfoque es permitido y viable dentro de la economía circular, se prioriza mantener el residuo como materia prima para producir un artículo idéntico al original. Esto tiene como objetivo reducir la necesidad de utilizar materias primas vírgenes.

Aterrizando lo anterior, con la información del sitio ocupado como área de estudio, se puede observar que las personas no suelen conocer la separación básica y que algunos personas comentan que si bien si recuperaban materiales de valor, en la actualidad al ya no contar con lugares de acopios cercanos, tienen a dejar de llevar acabo la costumbre de separar y dejarlo para como actividad del servicio de recolección, si bien en muchos países se cuenta con personas que se realizan estas actividades y que son considerados como pepenadores o sector informal, su papel es fundamental en la recuperación de materiales valorizables, por lo que son un pilar esencial en la gestión de residuos. Por otro lado, depender de este personal dificulta alcanzar la revalorización de materiales, es ahí donde hace falta una política que establezca la participación del productor para disponer de sitios estratégicos para recuperar sus residuos posconsumo e identificarlos del resto de fracciones que componen los residuos domésticos. Si bien puede parecer una apuesta riesgosa para las empresas, puede traer beneficios que quizás no se han visualizado como lo son: certificaciones, reducción de impuestos, disminuir el gasto en materias primas vírgenes, entre otros.

El comportamiento y la participación del consumidor tienen una gran incidencia en tres puntos clave para lograr un sistema circular en el manejo de residuos: separación, recolección y recuperación-aprovechamiento. Este aspecto es reconocido como esencial para consolidar una política pública (Henao-Rodríguez et al., 2024).

Algunos autores, como Hu et al. (2024), mencionan que las personas que viven bajo políticas obligatorias tienden a participar más activamente en la separación de residuos. Este enfoque resulta funcional, en contras-

te con lo encontrado por Xu et al. (2023), quien señala que las campañas educativas sobre el manejo de residuos no tuvieron ningún impacto en las comunidades ni en la reducción de residuos. Por tanto, la participación del consumidor depende del contexto donde se implemente, del atractivo y del compromiso de las personas (Muthová et al., 2022; Wojtarowski Leal et al., 2019).

Asimismo, existen factores externos al consumidor que influyen, como la inversión en tecnologías y educación para asegurar la separación y recolección selectiva, junto con el acceso a la información y el sentido de responsabilidad se presentan como obstáculos en la implementación de una política pública (Di Fiore et al., 2022; Acevedo Correa et al., 2023; Zambrano-Monserrate et al., 2020; Guo et al., 2017). Algunos de los factores anteriores se pueden observar de la información recuperada de la zona de estudio, en donde los encuestados mencionan que el servicio de recolección es limitado, además de no contar con una separación selectiva que se deriva del desconocimiento de la clasificación de residuos, es aquí donde una política pública como la propuesta en la que se asesore a las partes involucradas a como clasificar sus fracciones en orgánica e inorgánica puede facilitar el éxito de una mejor gestión de residuos, es aquí donde se manifiesta la importancia del parte gubernamental de proporcionar en primer instancia la asesoría e infraestructura necesaria, en donde el beneficio para la parte gubernamental será la preservación de espacios, la disminución de contaminación, eficiente el servicio de recolección al reducción la capacidad de carga diaria por casa, lo que a su vez se traduce a un ahorro en inversión en más camiones colectores o de limpieza.

Conclusión

Esta investigación ha permitido identificar los principales retos y oportunidades en la gestión de residuos domésticos, destacando la importancia de desarrollar políticas públicas más integrales y adaptadas a las necesidades reales de las comunidades. A través de una revisión de la literatura y el trabajo de campo, se evidenció que los enfoques actuales tienden a priorizar el reciclaje y la reutilización como una solución forzada para atender la

problemática del manejo de residuos, sin embargo, persisten barreras significativas, como limitaciones tecnológicas, carencias en infraestructura, desconocimiento por parte de los consumidores y una baja participación en la separación y recolección selectiva.

El éxito de una política pública en este ámbito depende de cuatro factores clave: el papel del productor, la participación del consumidor, la planificación adecuada y la obligatoriedad de las acciones, donde el análisis resalta la necesidad de que los productores adopten principios de diseño ecológico, facilitando la recuperación de materiales y reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes. Por otra parte, se reconoce la importancia del sector informal (pepenadores), quienes podrían ser integrados formalmente para fortalecer la recuperación de materiales valorizables.

En cuanto a los consumidores, se identificó que su participación es crucial en las etapas de separación, recolección y aprovechamiento de residuos, entendiendo que son el parte del pilar para la construcción de una gestión integral de residuos, para esto se requiere mejorar la educación ambiental, establecer mecanismos de responsabilidad compartida y garantizar el acceso a infraestructura adecuada. Además, las experiencias en otros países sugieren que las políticas obligatorias tienden a ser más efectivas en promover la participación y sostenida de la sociedad.

Finalmente, se destaca que la implementación de estas estrategias podría generar múltiples beneficios, como la reducción de residuos, la optimización del uso de recursos, la disminución de costos públicos y la creación de nuevas oportunidades económicas, sin embargo, es fundamental que las políticas contemplen mecanismos de monitoreo, evaluación y ajustes continuos para garantizar su efectividad en el tiempo.

Referencias

Acevedo Correa, D., Montero Castillo, P. M. y Marrugo Ligardo, Y. A. (2023). Gestión de desperdicios alimentarios: Una visión desde la política pública colombiana. *Revista Venezolana de Gerencia, 28*(102), 769-784. https://doi.org/10.52080/rvgluz.28.102.20

Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes, 50*(2), 179-211. https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T

Bellini, A. y Bonoli, A. (2017). Energy balance of waste management systems: A case study. En *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 1495-1499). IEEE. https://doi.org/10.1109/ieem.2017.8290142

Biron, M. (2020). Plastics sustainability: Drivers and obstacles. En *A practical guide to plastics sustainability: Concept, solutions, and implementation* (pp. 557-593). William Andrew. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821539-5.00011-2

Chen, F., Hou, J., Gu, X., Hou, J., Pan, Q. y Tang, Z. (2022). Research on temporal and spatial evolution of public's response to the mandatory waste separation policy based on big data mining. *Sustainable Production and Consumption, 31,* 236-248. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.013

Cortinas, C. (s/f). *Una gran ausencia en las reglamentaciones de gestión integral de residuos.* Centro de Estudios Jurídicos y Ambientales. http://www.ceja.org.mx/articulo.php?id_rubrique=193&id_article=2111

Di Fiore, G., Specht, K., Rover, O. J. y Zanasi, C. (2022). Stakeholders' social acceptance of a new organic waste management policy in the city of Florianópolis (Brazil). *Journal of Cleaner Production, 379,* 134756. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134756

Dietz, T., Gardner, G. T., Gilligan, J., Stern, P. C. y Vandenbergh, M. P. (2009). Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 106*(44), 18452-18456. https://doi.org/10.1073/pnas.0908738106

Fan, B. yang, W. y Shen, X. (2019). A comparison study of 'motivation-intention-behavior' model on household solid waste sorting in China and Singapore. *Journal of Cleaner Production, 211,* 442-454. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.168

Gaur, A., Gurjar, S. K. y Chaudhary, S. (2022). Circular system of resource recovery and reverse logistics approach: Key to zero waste and zero landfill. En Ch. Hussain y S. Hait (Eds.), *Advanced organic waste management* (pp. 365-381). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00008-3

Gobierno de México. (2022). Chiconcuac: Municipio del Estado de México. *Data México.* https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/chiconcuac#population-and-housing

Guo, B., Geng, Y., Sterr, T., Zhu, Q. y Liu, Y. (2017). Investigating public awareness on circular economy in western China: A case of Urumqi Midong. *Journal of Cleaner Production, 142,* 2177-2186. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.063

Gupta, J. (2023). E-waste: Policies and legislations for sustainable green growth. En P. Singh, P. Verma, ... y A. C. S. Batalhão (Eds.), *Waste management and resource recycling in the Developing World* (pp. 253-269). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90463-6.00002-6

Henao-Rodríguez, C., Lis-Gutiérrez, J. P. y Guzmán-Sierra, A. S. (2024). Factors influencing environmental awareness and solid waste management practices in Bogotá: An analysis using machine learning. *Air, Soil and Water Research, 17,* 11786221241261188. https://doi.org/10.1177/11786221241261188

Hu, J., Miao, L., Han, J., Zhou, W. y Qian, X. (2024). Waste separation behavior with a

new plastic category for the plastic resource circulation: Survey in Kansai, Japan. *Journal of Environmental Management, 349,* 119370. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119370

Hu, J., Tang, K., Qian, X., Sun, F. y Zhou, W. (2021). Behavioral change in waste separation at source in an international community: An application of the theory of planned behavior. *Waste Management, 135,* 397-408. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.028

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020: Microdatos.* https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos

Jaunich, M. K., Levis, J. W., DeCarolis, J. F., Barlaz, M. A. y Ranjithan, S. R. (2019). Solid waste management policy implications on waste process choices and systemwide cost and greenhouse gas performance. *Environmental Science & Technology, 53*(4), 1766-1775. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04589

Jiang, M. (2022). How public policies are implemented: A comparison of urban domestic waste classification policy implementation models. *Sustainability, 14*(22), 15480. https://doi.org/10.3390/su142215480

Kosior, E. y Crescenzi, I. (2020). Solutions to the plastic waste problem on land and in the oceans. En T. M. Letcher (Ed.), *Plastic waste and recycling* (pp. 415-446). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00016-5

Lama, N. (2024). *The world has a waste problem. Here's how to fix it.* International Finance. https://www.ifc.org/en/home

Lee, C. J., Sanna, R. A. y Czeisler, C. A. (2013). Public policy, sleep science, and sleep medicine. En *Encyclopedia of sleep* (pp. 156-166). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-378610-4.00163-7

Li, W., Sun, K., Liu, X., Wang, Z. y Li, G. (2023). What attributes of mandatory waste management policy can enhance the separation intention of residents in China? A behaviour choice experiment. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 25*(4), 2365-2380. https://doi.org/10.1007/s10163-023-01695-8

Lishan, X., Sha, H., Zhilong, Y., Ouwen, Z. y Tao, L. (2021). Identifying multiple stakeholders' roles and network in urban waste separation management-a case study in Xiamen, China. *Journal of Cleaner Production, 278,* 123569. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123569

Murakami, F., Sulzbach, A., Pereira, G. M., Borchardt, M. y Sellitto, M. A. (2015). How the Brazilian government can use public policies to induce recycling and still save money? *Journal of Cleaner Production, 96,* 94-101. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.083

Muthová, N. J., Vitálišová, K. y Lendvorský, M. (2022). Citizens' attitudes to nudges in the maintenance of public spaces and waste management. *NISPAcee Journal of Public Administration and Policy, 15*(1), 113-139. https://doi.org/10.2478/nispa-2022-0006

Nascimento, V. F., Sobral, A. C., De Andrade, P. R. y Ometto, J. P. H. B. (2015). Evolução e

desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. *Ambiente e Água, 10*(4), 889-902. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1635

Nnorom, I. C. y Odeyingbo, O. A. (2020). Electronic waste management practices in Nigeria. En M. N. V. Prasad, M. Vithanage y A. Borthakur (Eds.), *Handbook of electronic waste management* (pp. 323-354). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817030-4.00014-0

Ortiz Castro, G. y Contreras Rivera, J. R. (2023). Políticas públicas, gestión de residuos sólidos municipales y sostenibilidad ambiental: Una revisión. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 6*(6), 12258-12278. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.4253

Paton, C. (2008). Health policy: Overview. En H. K. Heggenhougen (Ed.), *International encyclopedia of public health* (pp. 211-225). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-012373960-5.00225-2

Rodić, L. y Wilson, D. (2017). Resolving governance issues to achieve priority sustainable development goals related to solid waste management in developing countries. *Sustainability, 9*(3), 404. https://doi.org/10.3390/su9030404

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2019). *Informe de la situación del medio ambiente en México: Edición 2018*.

Secretaría del Medio Ambiente (Sedema). (2017). *¿Cuánto cuesta deshacerse de la basura?* Gobierno de la Ciudad de México. http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sin-mono-sin-bolsita/costo_basura.html

Wang, Sh., Wang, J., Zhao, S. y Yang, S. (2019). Information publicity and resident's waste separation behavior: An empirical study based on the norm activation model. *Waste Management, 87,* 33-42. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.038

Wang, X. (2021). Analysis of influencing mechanism on waste separation behavior in Shanghai. *Sustainable Energy Technologies and Assessments, 47,* 101479. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101479

Wojtarowski Leal, A., Piñar Álvarez, M. D. L. Á. y Marín Muñiz, J. L. (2019). Actitudes de la ciudadanía hacia la separación de residuos en Coatepec, Veracruz, México. *Empiria: Revista de Metodología de Ciencias Sociales, 43*. https://doi.org/10.5944/empiria.43.2019.24303

Xu, Y., Wheeler, S. A. y Doko Tchatoka, F. (2023). Evaluating policy changes on council waste generation and diversion: Evidence from South Australia. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 67*(4), 541-557. https://doi.org/10.1111/1467-8489.12529

Zambrano-Monserrate, M. A., Ruano, M. A. y Yoong-Parraga, C. (2020). Households from developing countries do not sort their solid waste: Truth or myth? *Journal of Environmental Planning and Management, 63*(14), 2577-2592. https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1741341

Zhang, A., Xie, S., Gong, Y., Li, C. y Liu, Y. (2023). Barriers to compulsory waste sorting for a circular economy in China. *Journal of Environmental Management, 342,* 118180. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118180

Zhang, Y., Wang, G., Zhang, Q., Ji, Y. y Xu, H. (2022). What determines urban house-

hold intention and behavior of solid waste separation? A case study in China. *Environmental Impact Assessment Review, 93,* 106728. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106728

Sobre los autores

Coordinadores

Martínez Rodríguez, María Concepción

Doctora en Política Pública egresada de la Escuela de Graduados en Administración Pública y Política Pública del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, cuenta con la maestría en Administración Pública y Políticas Públicas por la misma institución, y la carrera de Ingeniero Químico Industrial por el Instituto Politécnico Nacional. Profesora-investigadora del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), pertenece al Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1 Su experiencia profesional se ha desarrollado en el Sector académico en el CIIEMAD, en el sector Gobierno trabajó en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) como Subdirectora de Movimientos Transfronterizos y Asuntos Internacionales y en el sector privado cuenta con una experiencia de más de 10 años en empresas transnacionales. Actualmente coordina el SustentaTerra en el IPN, grupo de investigación dedicado a la difusión de la ciencia. Ha publicado libros, artículos científicos, capítulos de libro, participación en congresos nacionales e internacionales, dirigido proyectos de investigación, impartición de asignaturas a nivel posgrado (maestría y doctorado), dirección de tesis licenciatura, maestría y doctorado. Sus principales líneas de investigación son políticas públicas, gobernanza, gestión ambiental, cambio climático, desarrollo sustentable, soluciones basadas en la naturaleza, transdisciplina. Pertenece a la red de medio ambiente del IPN, red de economía circular de la UNAM. Las últimas dos publicaciones son:

- Cervantes-Nájera, A. L., Martínez-Rodríguez, M. C., Pitchaimani, G.-P., Muthuswamy Ponniah, J. y Bello-Yañez, X. V. (2025). Spatial suitability analysis for the implementation of green rooftops in highly urbanized Mexico City: A GIS-based multicriteria decision analysis to alleviate urban heat island (UHI). *Sustainable Cities and Society,* (131), 106780. https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106780
- Ramírez-Escamilla, H. G., Martínez-Rodríguez, M. C., Domínguez-Solís, D., Cervantes-Nájera, A. L. y Campos-Villegas, L. E. (2025). Identifying circularity in nature-based solutions: A systematic review. *Sustainability, 17*(19), 8722. https://doi.org/10.3390/su17198722

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3094-5411

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Maria-Martinez-Rodriguez-2

Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=es&authuser=1&user=NByc9WUAAAAJ

Academia: https://mariaconcepcionmartinezrodriguez.academia.edu/ ; https://ipn.academia.edu/Mar%C3%ADaConcepci%C3%B3nMart%C3%ADnezRodr%C3%ADguez

Ramírez Escamilla, Héctor Guadalupe

Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad e Ingeniero Ambiental, ambos por el Instituto Politécnico Nacional. Fue practicante en la Cooperación Técnica Alemana (GIZ) en México, donde colaboró en proyectos enfocados en la gestión integral de residuos y su vinculación con la economía circular. Su trayectoria se ha centrado en la gestión de residuos sólidos urbanos y textiles, con un enfoque transversal en sustentabilidad, economía circular e inclusión social. Ha participado en investigaciones sobre recolección inteligente de residuos textiles y el desarrollo de planes de manejo sustentable. Cuenta con publicaciones en revistas científicas como MDPI, destacando los artículos: "Advancing toward sustainability: A systematic review of circular economy strategies in the textile industry" en *Recycling*, y "Identifying circularity in nature-based solutions: A systematic review" en *Sustainability*. Ha sido ponente en congresos internacionales organizados por instituciones como la Universidad de Buenos Aires y la Universidad Autónoma de Madrid, presentando temas como "Gobernanza ambiental en

residuos sólidos urbanos: Políticas, manejo y relevancia" y "Abordando la desigualdad a través de la gestión de residuos sólidos urbanos", lo que refleja su compromiso con la divulgación científica y el diálogo interdisciplinario ante los retos ambientales actuales.

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9440-4644

Academia: https://ipn.academia.edu/HectorRamirezEscamilla

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=fyJvKSQAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Hector-Ramirez-Escamilla

Domínguez Solís, Diego

Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Instituto Politécnico Nacional (IPN), en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD), e Ingeniero Ambiental por la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI) del mismo instituto. Su labor académica se enfoca en el estudio de las soluciones basadas en la naturaleza, los humedales construidos, la gestión sustentable del agua y la economía circular, con un interés particular en los sistemas descentralizados de tratamiento y en los enfoques interdisciplinarios para la sustentabilidad ambiental. Ha colaborado en redes académicas dedicadas a la investigación del agua y la educación ambiental, y forma parte del equipo de SustentaTerra, *podcast* de divulgación científica especializado en temas ambientales. Participa como coordinador del libro *Economía circular mexicana, vol. 2* (2026) y es autor de diversas publicaciones científicas, entre las que destacan "Constructed wetlands as a decentralized treatment option for domestic wastewater: A systematic review (2015-2024)", "Transdisciplina del agua en México: Revisión de humedales artificiales" (2025), "Identifying circularity in nature-based solutions: A systematic review" (2025) y "El papel de la tecnología para la gestión integral de residuos textiles en México: Una revisión" (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8402-5157

Academia: https://independent.academia.edu/DiegoDominguezSolis

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=Ea3jXgkAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Diego-Dominguez-Solis

Autores

Aguilar Huesca, Juan Andrés

Estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Ingeniero en energía por la Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo (UPMH);. Líneas de investigación: Valorización de residuos y Producción de biofertilizantes. Publicaciones recientes: "Cultivos hidropónicos bajo un enfoque de economía circular" (2025), Capítulo titulado "Biorrefinería de Opuntia para obtener bioproductos y biocombustibles en zonas áridas y semiáridas: estudios de caso" (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0921-1704

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Juan-Huesca

Ahumada Lazo, Rubén

Director del programa de Ingeniería en Desarrollo Sustentable desde 2023 y profesor del Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil en el Tecnológico de Monterrey, campus Ciudad de México desde 2022. Ese mismo año realizó un proyecto de consultoría para la empresa Excyton Ltd. en las instalaciones de King Abdullah University of Science and Technology, en Arabia Saudita. Ha trabajado como investigador asociado en Durham University (2021-2022) y University of Manchester (2019-2021), donde también realizó sus estudios de doctorado en Física, estudiando las propiedades optoelectrónicas y de superficie de nanopartículas *(quantum dots)* de diferentes materiales para aplicaciones en LEDs, celdas solares y biosensores (2015-2019). Cuenta con Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería Ambiental por la Universidad Autónoma de Nuevo León (2012-2014) donde trabajó en el desarrollo de películas semiconductoras para la descontaminación fotocatalítica del agua. Es Ingeniero Químico por la Universidad Autónoma de Chihuahua (2007-2011). Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores del Conahcyt (Nivel 1), ha publicado más de 25 trabajos de investigación, incluyendo artículos en revistas indexadas, en memorias de congreso y tesis, colaborando con grupos académicos multidisciplinarios, empresas y centros de investigación en Norte América, Europa y Asia. Actualmente lidera proyectos multidisciplinarios de investigación en ingeniería aplicada a la sustentabilidad y de innovación edu-

cativa. Sus artículos más recientes incluyen: "Optimization methodology for project management: A case study for quantum dots synthesis" (2025) y "From lectures to active learning: A case study on problem-based learning in the material balances course" (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1524-9576

Academia: https://itesm.academia.edu/RubenAhumadaLazo

Google Académico: https://scholar.google.ca/citations?hl=en&user=VcCQ_OIAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Ruben-Ahumada-Lazo

Alcaraz Ibarra, Sergio

Doctor y Maestro en Ciencias del Agua, por el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua de la UAEMex; Ingeniero en Biotecnología por la Universidad Tecnológica de Morelia. Profesor investigador por tiempo determinado en la Universidad Autónoma del Estado de México; Miembro del SNII nivel C; Socio numerario de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería. Líneas de investigación: tratamiento de aguas residuales municipales e industriales en sistemas biológicos psicrófilicos; revalorización de residuos sólidos y líquidos; biotecnología ambiental; biocombustibles. Autor en *First derivative of gompertz equation: identification of substrate fractions in psychrophilic anaerobic digestion* (2025); *Model and methods for determining mixed liquor suspended solids of aerobic granular sludge reactors* (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2270-5741

Academia: https://uaemex.academia.edu/SergioAlcarazIbarra

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Alcaraz-Ibarra

Álvarez García, Yazmín Isolda

Doctora en Estudios Jurídicos (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco). Cuenta con una maestría en Derecho Constitucional, Amparo y Derechos Humanos (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco), estudios de Licenciatura en Derecho (Universidad Anáhuac, Mérida). Su área de investigación son la propiedad intelectual, género, derechos humanos y las vulnerabilidadades y el impacto de estas en las personas, grupos e instituciones en su territorio geográfico y digital, así mismo diseña proyectos de investigación e intervención para ofrecer soluciones prácticas en temas tales como migración, pobreza, género, protocolos de actuación

en casos de violencia, acoso u hostigamiento, consecuencias de la violencia y discapacidad psicosocial, masculinidades y su relación con la violencia y su despatriarcalización, etc. Actualmente es Coordinadora de la Maestría en Estudios Jurídicos programa SNP, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, miembro del Cuerpo Académico Consolidado de Derecho, Psicología y otras ciencias, vulnerabilidades y derechos humanos y profesora-investigadora titular de esa casa de estudios, Miembro del Grupo de Investigación Protección Social: Igualdad de Género y Derechos de la Mujer. Publicaciones recientes: libro: Identidad y Cuidados Masculinos Vivencias de varones en la economía circular comunitaria (2024), capítulo de libro: "Las marcas colectivas en la economía del caco tabasqueño: hacia una colectiva para el chocolate" (2025), en *Problemas actuales sobre derechos humanos: Perspectivas interdisciplinares,* y el artículo "Un acercamiento en el Análisis Predictivo de la Violencia entre Mujeres llamada Wollying" en *FACE: Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales* (2025), del cual es coautora.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0587-0406

Scopus: https://www.scopus.com/pages/authors/57217363662

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=bsH3nDsAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Yazmin-Alvarez-Garcia

Ávila Andrade, Abigail

Maestra en Ciencias del Agua, por el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex); Licenciada en Biotecnología por la Facultad de Ciencias de la UAEMex. Beneficiaria con la Beca Nacional para Estudios de Posgrado de SECIHT y miembro de la sociedad de Encuentro de Estudiantes de Posgrado en Agua (EEPA) 2024. Su línea de investigación se centra en el tratamiento, estabilización y valorización de residuos sólidos y líquidos a través del uso de bioaumentación. Publicaciones recientes *Biodegradation potential of thermophilic cellulolytic bacteria isolated from urban organic waste composting* (2025).

ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3704-7142

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Abigail-Avila-Andrade?ev=hdr_xprf

Bedolla Solano, Irma

Doctora en Ciencias de la Educación por la Escuela Normal "Justo Sierra" (México). Obtuvo la Maestría en Impuestos y la Licenciatura en Contaduría en la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro). Se ha desempeñado como jefa de proyectos de investigación del programa educativo de contador público y secretaria de la academia de contador público del Instituto Tecnológico de Acapulco (ITA), es profesora de licenciatura y posgrado en el Tecnológico Nacional de México Campus Acapulco. Es Miembro del SNII nivel Candidato de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI); del Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Guerrero (COCYTIEG); de la Federación Global de Profesiones A. C. (FGDP); Integrante de la Red de Investigación en Desarrollo Regional del TecNM; Líneas de investigación: Desarrollo Regional Sustentable (DRS) y Gestión de Proyectos para el Desarrollo Solidario (GPDS) en el posgrado de Maestría en Desarrollo Regional e Innovación Tecnológica (MDRIT); y Sistemas de Información Contable Fiscal y Auditoría de la carrera de Contador Público (CP). Ha realizado y dirigido proyecto de investigación y elaborado publicaciones de artículos científicos en revistas nacionales e internacionales. Publicaciones recientes "Water situation in Las Vigas from a socioenvironmental perspective" (2025), "Programa de Educación Ambiental No Formal y Sustentable sobre Residuos Sólidos Urbanos (PEANFSRSU) para habitantes de la Comunidad, Las Vigas, Gro., México" (2024).

ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9499-8397

Academia: https://cvu.dpii.tecnm.mx/index.php/docs/extenso/

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=e7O3RPEAAAAJ

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Irma-Bedolla-Solano?ev=hdr_xprf

Bedolla Solano, Juan José

Posdoctorado en Metodología de la Investigación Científica, Socioformación y Desarrollo Humano por el Centro Universitario CIFE; Doctor en Desarrollo Regional, por el Centro de Ciencias de Desarrollo Regional (CCDR), y Maestría en Administración, por la Unidad de Estudios de Posgrado e Investigación (UEPI) ambos posgrados de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro); Ingeniero en Sistemas Computacionales, por el Instituto Tecnológico de Acapulco (ITA) del

Tecnológico Nacional de México (TecNM). Profesor investigador en el ITA. Miembro del SNII nivel 1 de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI); del Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Guerrero (COCYTIEG); del Sistema Estatal de Investigadores Educativos de la Secretaría de Educación Guerrero; de la IEEE; de la Federación Global de Profesiones A. C. (FGDP); de la Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, A. C. (AMECIDER, A.C.) y la Regional Science Association International (RSAI). Integrante y fundador de la Red de Investigación en Desarrollo Regional del TecNM; Red de Innovación, Tecnología, Desarrollo y Sustentabilidad de la FGDP; Miembro activo y fundador de la Red de Investigación "Desarrollo, cambio Climático y adaptabilidad Socioambiental" (RIDECCAS). Líneas de investigación: Desarrollo de Tecnologías e Innovación (DTI), Desarrollo Regional Sustentable (DRS) y Gestión de Proyectos para el Desarrollo Solidario (GPDS) en el posgrado de Maestría en Desarrollo Regional e Innovación Tecnológica (MDRIT); y Automatización y Sustentabilidad de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales (ISC). Responsable técnico del proyecto "Diagnóstico automatizado de la enfermedad del covid-19 en imágenes digitales de los pacientes como estrategia de desarrollo sostenible en el sector salud", financiado por el Tecnológico Nacional de México (TecNM); e integrante colaborado en el proyecto "Fortalecimiento de capacidades resilientes en la reducción del riesgo de desastres en comunidades costeras de Guerrero, México" en modalidad Redes de Investigación. Publicaciones recientes:" Prácticas digitales y sostenibilidad socioambiental en la educación básica de las Smart Cities" (2023), "Urban Design and Planning with Home Automation Engineering and Sustainable Architecture for Residential Spaces in Smart Cities" (2024), y "Gestión tecnológica y emprendimiento de proyectos socioeconómicos como estrategia de bienestar y sostenibilidad en comunidades rurales y semiurbanas de Guerrero, México" (2024).

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6999-8823

Academia: https://mdrit.acapulco.tecnm.mx/documentos/maestria/CVTecnico/CV-T%C3%A9cnico-TECNM-ITA-JJBS.-28-mar-2023.pdf

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=eBz2iVoAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Juan_Solano21

Beltrán Hernández, Rosa Icela

Doctora y Maestra en Ciencias, con especialidad en Biotecnología, por el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV IPN) e Ingeniera Bioquímica por el Instituto Tecnológico de Jiquilpan. Actualmente se desempeña como Profesora Investigadora en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Es Miembro del SNII nivel 1; integrante del Cuerpo Académico Consolidado "Biotecnología y Microbiología Ambientales", también pertenece a la Red Mexicana de Bioenergía y a la Red Iberoamericana de Medio Ambiente. La Línea de investigación que cultiva es "Evaluación y remediación de sistemas acuáticos, terrestres y atmosféricos". Dos de sus publicaciones más recientes son las siguientes: Proceso de extracción de pectina y mucílago

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0678-6991

Scopus: https://www.scopus.com/pages/authors/6506567109

Google Académico: https://scholar.google.com.mx/citations?user=Uf17kjgAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/R-Icela-Beltran-Hernandez

Beristain Cardoso, Ricardo

Doctor en Biotecnología por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), institución en la que también obtuvo la maestría en Biotecnología y la licenciatura en Ingeniería Bioquímica Industrial. Realizó una estancia posdoctoral en la Universidad de Santiago de Compostela, España. Se ha desempeñado como profesor-investigador titular C en la UAM, Unidad Lerma. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores del SECIHTI, con nivel 2. Sus líneas de investigación se enfocan en el desarrollo de sistemas híbridos y el acoplamiento de procesos biológicos para la depuración de aguas residuales. Entre sus publicaciones más recientes destacan Intensifying hydrogenotrophic methanogenesis in electrode-assisted UASB reactor under room-temperature conditions (2025) y Physical, chemical and bromatological characterization of the organic fraction of urban solid waste: potential and possible applications (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1548-7678

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=RCrYP_0AAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Ricardo-Beristain-Cardoso

Bigurra Alzati, Alfredo

Doctor, Maestro y Licenciado en Arquitectura por la UNAM y Especialista en Compugrafía por la ED-INBA. Cuenta con estudios en Arquitectura Bioclimática por la UMA y en Sistemas de Información Geográfica por la UCSAM. Ha colaborado en diversas empresas constructoras en distintos estados del país y ejercido la docencia en instituciones particulares y de educación tecnológica. Actualmente se desempeña como Profesor Investigador en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y como Profesor de Asignatura en el Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la UNAM. Es reconocido con el Perfil PRODEP-SEP y pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII-SECIHTI) con Nivel II (dos). Su línea de investigación se centra en la habitabilidad sostenible y en la morfología del hábitat en las ciudades, ámbitos desde los cuales ha desarrollado publicaciones científicas arbitradas e indizadas, en colaboración con investigadoras e investigadores mexicanos. Como parte de sus publicaciones, recientemente se encuentra como coautor del libro "Sustainable spaces in arid and semiarid zones of Mexico" (2024) y como coautor del artículo "Design of Urban Indicators to Optimize the Implementation of Low-Impact Techniques in Semi-Arid Cities" (2024)

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9740-9483

Scopus: https://www.scopus.com/pages/authors/57195231022

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=CarlosAlfredo-Bigurra-Alzati

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Bigurra-Alzati

Cabrera Tena, Uriel Winston

Maestro en Gestión para el Desarrollo Sustentable por la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro), en Proceso de registro de título y cédula profesional de la Maestría en Gestión Ambiental por el Centro Universitario México. Es licenciado en Biología Experimental. Presidente de Biólogos por el Ambiente y la Actualización Educativa Asociación Civil (BIOAAE A. C.) organización que promueve el desarrollo profesional y la conservación del ambiente, Miembro de la Federación Mexicana de Colegios de Biólogos (FEMCOBI). Actualmente se desempeña como docente por contrato de la Universidad Virtual del Estado de Guerrero (UVEGro). Promotor y Educador Ambiental, Capacitador en temas de Agroecología, Ecotecnologías y Gestión de Residuos Sólidos Urbanos. Colaborar con distintas agrupa-

ciones, colectivos y organizaciones así como instituciones educativas y del sector privado y gubernamental en temas ambientales.

Colaboración en artículo "Afro-Indigenous harvests: Cultivating participatory agroecologies in Guerrero, Mexico" en https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00104

ORCID: https://orcid.org/0009-0003-1139-9301

Castellanos Suárez, Viviana

Doctora en Métodos de Solución de Conflictos y Derechos Humananos (Universidad Juárez Autónoma de Tabasco). Cuenta con una maestría en Psicología Jurídica y Criminología (Instituto Universitario Puebla), estudios de Licenciatura en Psicología (Universidad Iberoamericana, México), estudios especializados en psicotrauma (Instituto Newman, México). Su área de investigación son las violencias y las vulnerabilidadades psicosociales y el impacto de estas en las personas, grupos e instituciones en su territorio geográfico y digital, así mismo diseña proyectos de investigación e intervención para ofrecer soluciones prácticas en temas tales como migración, pobreza, género, protocolos de actuación en casos de violencia, acoso u hostigamiento, consecuencias de la violencia y discapacidad psicosocial, masculinidades y su relación con la violencia y su despatriarcalización, etc. Actualmente es Coordinadora de la Maestría en Ciencias en Intervención Psicosocial programa SNP, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, miembro del Cuerpo Académico Consolidado de Derecho, Psicología y otras ciencias, vulnerabilidades y derechos humanos y profesora-investigadora titular de esa casa de estudios. Publicaciones recientes: libro *Identidad y cuidados masculinos: Vivencias de varones en la economía circular comunitaria* (2024); capítulo de libro "Violencia contra la mujer y discapacidad psicosocial: Cuestión de derechos humanos" (2025) en *Problemas actuales sobre derechos humanos: Perspectivas interdisciplinares,* y artículo "Un acercamiento en el Análisis Predictivo de la Violencia entre Mujeres llamada Wollying", *FACE: Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales* (2025), del cual es coautora.

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2506-8207

Scopus: https://www.scopus.com/pages/authors/57553173100

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=USboXpEAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Viviana-Castellanos-Suarez

Ceballos Pérez, Sergio Gabriel

Doctor y Maestro en Economía, por la Universidad Nacional Autónoma de México. Se desempeña actualmente como Investigador por México de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) comisionado a la Universidad Politécnica de Pachuca desde el 2022. Así mismo, forma parte del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I. Forma parte y es miembro fundador de la Red Mexicana de Bioeconomía Circular y de la Red Latinoamericana de Bioeconomía. Sus trabajos académicos se encuentran relacionados con la sustentabilidad, economía circular, bioeconomía y residuos sólidos urbanos. Cuenta con artículos y libros como: Experiencias y expectativas de la bioeconomía (2023). Ceballos S. y Azamar A., Editorial UAM; Generación de residuos sólidos urbanos municipales y su relación con un indicador de ingreso municipal en México (años 2010 y 2015) (2024). Ceballos S. y Flores R. *Revista de Ciencias Ambientales, 57*(1), 1-22. https://doi.org/10.15359/rca.57-1.7

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4991-3540

Academia: https://conacyt.academia.edu/SergioCeballos

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=riI3UGQAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Gabriel-Perez?ev=hdr_xprf

Cervantes Zepeda, Iván

Doctor y Maestro en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México. Realizó su licenciatura en Biología en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente se desempeña como profesor-investigador en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México. En el mismo instituto desempeño el cargo de Coordinador de Planeación. Cuenta con el reconocimiento como perfil deseable PRODEP. Integrante del Cuerpo Académico "Tecnodesarrollos a partir de residuos sólidos y líquidos" del IITCA. Participa en la Red Latinoamericana de Servicios de Extensión Rural México (RELASER México). En el instituto generó la línea de investigación Desarrollo, validación transferencia de productos y procesos para el uso, acondicionamiento y gestión de residuos sólidos y líquidos. Recientemente ha publicado: Physical, chemical and bromatological characterization of the organic fraction of urban

solid waste: Potential and possible applications Article April 2025, en 2023 publico el artículo "Gestión de los residuos sólidos en México: análisis cualitativo de los diagnósticos básicos: Solid waste management in Mexico: qualitative analysis of basic diagnoses"

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2859-1223
Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=3IaJz1sAAAAJ
ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Ivan-Cervantes-Zepeda

Compeán González, Claudia Lorena

Candidata Doctoral en Materiales por la Universidad de Manchester, Inglaterra. Cuenta con una Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental por parte de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Egresada de la carrera de Ingeniera en Materiales del Instituto Tecnológico de Morelia. Actualmente se desempeña como Profesora de Cátedra del Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, en los Campus Ciudad de México y Campus Santa Fe. Las áreas de enseñanza incluyen ciencia de materiales, sustentabilidad, descarbonización, economía circular, tratamiento de agua, energías renovables, entre otros. Adicionalmente participa en proyectos de investigación sobre gestión y aprovechamiento de residuos orgánicos, y de gestión hídrica en comunidades vulnerables, en esta misma institución. Ha participado en proyectos con diferentes instituciones en México como el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), COMIMSA y la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), y ha colaborado con varias instituciones Internacionales. Cuenta con la acreditación: "Associate Fellow of the Higher Education Academy" por parte de la Advance HE de Reino Unido, y ha impartido cursos en diversas instituciones como la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), la Universidad de Manchester (The University of Manchester) y la ACU (Association of Commonwealth Universities). Adicionalmente cuenta con experiencia en diversas áreas administrativas, fue consultora de Energía Renovable (solar), es colaboradora de la colectiva Mexicanas frente al Cambio Climático, Climate Reality Leader, y participa en diversas actividades de divulgación que promueven la ciencia, la innovación, la sustentabilidad y la equidad de género. Publicaciones recientes: "Optimization methodology for project management: A case study for quantum dots synthesis" (2025) y "4-Mercaptobenzoic acid adsorption on TiO_2 anatase (101) and TiO_2 rutile (110) surfaces" (2022).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2367-8450

Academia: https://cinco-itesm.academia.edu/ClaudiaLorenaCompeanGonzalez

Google Académico: https://scholar.google.com.mx/citations?hl=es&user=XDVLu8kAAAAJ

Coronel Olivares, Claudia

Doctora en Territorio y Medio Ambiente (homologado a Ciencias Ambientales); Máster en Contaminación ambiental, ambos por la Universidad Politécnica de Madrid (España); Bióloga por la Universidad Nacional Autónoma de México. Se ha desempeñado como coordinadora adjunta de la licenciatura en química y del Doctorado en Ciencias ambientales en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Actualmente, es Profesora investigadora del Área Académica de Química de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pertenece al Nivel 1 del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores y es perfil deseable por el PRODEP. Las líneas de investigación son microbiología del agua e indicadores microbiológicos, desinfección y microorganismos extremófilos. Publicaciones recientes: Kinetic Models of Disinfection with Sodium Hypochlorite and Peracetic Acid of Bacteria Isolated from the Effluent of a WWTP (2023) y Isolation and Characterization of Thermophilic Bacteria from a Hot Spring in the State of Hidalgo, Mexico, and Geochemical Analysis of the Thermal Water (2024).

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9137-2894

Academia: https://independent.academia.edu/ClaudiaCoronelOlivares

Google Académico: https://scholar.google.es/citations?view_op=search_authors&mauthors=Claudia+Coronel-Olivares&hl=es&oi=ao

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Claudia-Coronel-Olivares/research

Florêncio da Silva, Rodrigo

Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo por el Instituto Politécnico Nacional, posee estudios de maestría en Educación por la Universidad Interamericana para el Desarrollo y las especializaciones en Uso de las TIC en la Educación por la Universidad São Paulo y en Dialéctica de la Lengua Portuguesa por la Universidad Guarulhos, con graduación en Letras Españolas por el Centro Universitario de Santo André y graduado en Letras, Portuguesa-Inglesa por la Universidad Gua-

rulhos . Recientemente finalizó la carrera de Periodismo por la Universidad Cruzeiro do Sul. Actualmente se encuentra en la ESIME Ticomán del Instituto Politécnico Nacional en los programas de Maestría de Ingeniería Aeronáutica y Maestría Ciencias en Ingeniería Aeronáutica y Espacial. También laboró en la Dirección de Investigación de la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional hasta octubre de 2021 e imparte clase como profesor invitado en la Maestría de Administración de Empresas para la sustentabilidad en la Escuela Superior de Comercio y Administración (ESCA) Santo Tomás del IPN. Colabora con la Fundación Universitaria Iberoamericana en la dirección de tesis doctorales en Brasil, México y Mozambique.

Actualmente es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) Nivel I y dirige alumnos de maestría y doctorado con temas relacionados con el Medio Ambiente y Desarrollo. Posee proyectos de investigación dentro del Instituto Politécnico Nacional en el área de Ciencias Sociales y es autor de libros, de capítulos de libro y de artículos indexados.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9644-7645

Scopus: https://www.scopus.com/pages/authors/58286696100

Fonseca Ortiz, Carlos Roberto

Doctor y maestro en Ciencias del Agua por el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) ahora Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), ingeniero civil por la Universidad Autónoma del Estado de México. Profesor- investigador y actualmente ha sido designado como Encargado del Despacho de la Dirección del IITCA. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (nivel 1) desde 2014 de manera ininterrumpida; así como de asociaciones como la Red Mexicana de Recursos Hídricos (REMRH), Red Mexicana de Profesores de Hidráulica (REMEPROH) y Red Temática Gestión e Investigación del Agua. Las líneas de generación y aplicación del conocimiento que desarrolla están orientadas al tecnodesarrollo en ciencias del agua y la economía ecológica de recursos hídricos. Entre los temas que aborda en sus investigaciones, se encuentran los sistemas integrales de cosecha de lluvia (captación y generación de energía eléctrica), la gestión de recursos hídricos en términos energéticos (basados en el emergy accounting) y la caracterización de cuerpos superficiales de agua por sensores remotos entre otros, los cuales reflejan un alto impacto en la sociedad y el conocimiento a mediano y largo plazo. Por ejemplo, vistos en publicaciones como Diseño y análi-

sis mediante DFC de un aireador tipo Venturi para su uso en el tratamiento de agua residual (2025) y Assessment of Regression Models for Surface Water Quality Modeling via Remote Sensing of a Water Body in the Mexican Highlands (2023)

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3377-6564

Scopus: https://www.scopus.com/pages/authors/55810311900

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=GvymheEAAAAJ

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Fonseca-23?ev=hdr_xprf

Gallego Alarcón, Iván

Doctor y Maestro en Ciencias del Agua por la Universidad Autónoma del Estado de México. Realizó su licenciatura en Ingeniería Bioquímica, Administrador en la Explotación de Recursos Acuáticos en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Actualmente se desempeña como profesor-investigador en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México. En el mismo instituto desempeño el cargo de subdirector administrativo. Cuenta con el reconocimiento SNII nivel 1, así como perfil deseable PRODEP, es miembro de la World Aquaculture Society. Integrante del Cuerpo Académico "Tecnodesarrollo en Ciencias del Agua" del IITCA. En el instituto generó la línea de investigación en bioingeniería acuícola. Recientemente ha publicado: Effect of sex ratio on reproduction, fecundity, and fertility of Montezuma dwarf crayfish *(Cambarellus montezumae,* Saussure 1857) in closed aquaculture systems (2025), en 2024 publicó el artículo "Effects of yeast and willow extract in the diet on the survival and growth parameters of the crayfish *(Cambarellus montezumae)".*

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9125-6532

Scopus: https://www.scopus.com/pages/authors/55356975700

Academia: https://uaemex.academia.edu/IvanGallegoAlarcon

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=4v-okMQAAAAJ

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Ivan-Gallego-Alarcon

García Mondragón, David

Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Obtuvo la maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex) y la licenciatura en Biología por la misma universidad. Es profesor-investigador de tiempo completo en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México. Es candidato al Sistema Nacional de Investigadores y cuenta con el perfil deseable PRODEP. Miembro de la World Aquaculture Society. Integrante del Cuerpo Académico "Tecnodesarrollo en Residuos Sólidos y Líquidos" del IITCA. En el instituto generó la línea de investigación en revalorización de residuos sólidos y líquidos, también participa en la línea de investigación de bioingeniería acuícola. Recientemente publicó "Effect of sex ratio on reproduction, fecundity, and fertility of Montezuma dwarf crayfish (Cambarellus montezumae, Saussure 1857) in closed aquaculture systems (2025); "Physical, chemical and bromatological characterization of the organic fraction of urban solid waste: Potential and possible applications" (2025) y "Biodegradation potential of thermophilic cellulolytic bacteria isolated from urban organic waste composting" (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1721-5465

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=kXg0m2wAAAAJ&hl=es&oi=ao

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/David-Garcia-Mondragon/research

González Blanco, Gehovana

Doctora y Maestra en Biotecnología por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), e Ingeniería Bioquímica Industrial, por la misma institución. Profesora-Investigadora de Tiempo Completo en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Cuenta con el reconocimiento SNII nivel 1, y perfil deseable PRODEP. Es socia numeraria de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería (SMBB). Área de investigación en Biotecnología ambiental e industrial en proyectos relacionados con los aspectos metabólicos de consorcios microbianos con aplicación en el tratamiento de aguas residuales, bioprocesos, bioingeniería, tratamiento integral y valorización de residuos sólidos y líquidos. Entre sus publicaciones más

recientes se encuentran: "Biodegradation potential of thermophilic cellulolytic bacteria isolated from urban organic waste composting" (2025) y "Physical, chemical and bromatological characterization of the organic fraction of urban solid waste: Potential and possible applications" (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3818-3458

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=O2IOIBwAAAAJ&hl=es&oi=ao

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Gehovana-Blanco

Guerrero García-Rojas, Hilda

Doctora en Ciencias Económicas por la Universidad de Toulouse, Francia. Cuenta con el grado de Master of Arts in Economics por la University of Colorado at Boulder, así como con la Maestría en Matemáticas Aplicadas a la Economía por el Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE). Es Licenciada en Economía por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Actualmente pertenece al Cuerpo Académico Consolidado 169 y a los núcleos académicos de los Estudios de Posgrado de la Facultad de Economía de la UMSNH, donde desarrolla labores de docencia e investigación. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI Nivel I) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). En 2024 recibió el reconocimiento Legado Nicolaíta por su destacada trayectoria académica. Integrante del Consejo Consultivo de Cambio Climático del Estado de Michoacán. Sus líneas de investigación se centran en la economía circular, economía del agua, cambio climático y valoración económica de los recursos hídricos. Entre sus publicaciones más recientes destacan Understanding the characteristics of the green, circular and bioeconomy models within the context of sustainable development (2025) y Analyzing the Feasibility of Lithium Extraction in Mexico: Supply Chain Modeling with Economic and Environmental Considerations (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4226-8027

Hubenova Nencheva, Violena

Doctora en Ciencias Económico-Administrativas por la Universidad de Economía Nacional y Mundial de Sofía, Bulgaria, y Maestra en Negocios Internacionales por la Universidad de Dauphine de París, Francia y también de Ciencias Económico-Administrativas por la Universidad de Economía Nacional y Mundial de Sofía,

Bulgaria, obtuvo sus estudios de licenciatura en Finanzas por la Universidad de Economía Nacional y Mundial de Sofía, Bulgaria. Actualmente se desempeña como profesora e investigadora en la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), México. Es miembro del SNII nivel Candidato desde 2023. Ha colaborado en proyectos de investigación vinculados con marketing, innovación, sostenibilidad, energías renovables y ciudades inteligentes, así como en estudios sobre transformación digital y estrategias empresariales en contextos de crisis. Sus líneas de investigación principales incluyen: Marketing estratégico e innovación empresarial, Economía circular y desarrollo sostenible e Inteligencia artificial y tecnologías aplicadas al desarrollo urbano. Publicaciones recientes: "Ciudades inteligentes y la implementación de la inteligencia artificial en el transporte autónomo: Una propuesta para la ciudad de Querétaro" (2025) y "Análisis de la mezcla de marketing en México y las energías renovables como parte de su crecimiento económico en el APEC para el periodo 2015-2024" (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0904-7281

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=xS6q2CsAAAAJ

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Violena-Nencheva-2

Landero Valenzuela, Kenia

Doctora en Administración, es Docente- Investigador del TecNM campus de los Ríos desde 2007 a la fecha, pertenece a la academia de la Licenciatura en Administración, de este campus, es perfil deseable por el PRODEP, Investigador nivel I del Sistema Nacional de Investigadores; pertenece al cuerpo académico en consolidación: Ciencias Socioeconómico Administrativas de la Licenciatura en Administración, con el cual ha desarrollado diversos proyectos de investigación con financiamiento externo con la línea de investigación Estrategias Empresariales, de igual manera es miembro del Sistema Estatal de Investigadores desde 2016 a la fecha, ha participado con ponencias en diferentes foros, congresos nacionales e internacionales, publicando diversos artículos en memorias de congresos, revistas y capítulos de libro. Ha sido asesor en diversos eventos de emprendedores a nivel nacional, así como ha participado como jurado en varios de ellos. Desde 2019 ha fungido como revisor y evaluador de la guía consultiva de los municipios de Emiliano Zapata y Balancán por parte del INAFED. Participó en la transferencia del modelo de incubación e innovación empresarial del Tecnológico Superior de los

Ríos en el cual fungió como consultor y tuvo a su cargo el programa de emprendedores de 2011 a 2013.

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4561-0155

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=Y3q-RgkAAAAJ

Lizárraga Mendiola, Liliana G.

Doctora en Ciencias de la Tierra por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 2008, el de Maestra en Ciencias Geológicas por la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) en 2003, y el de Ingeniera Civil por el Instituto Tecnológico Nacional de México, campus Durango. Desde 2008 se desempeña como profesora-investigadora de tiempo completo en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), donde desarrolla labores de docencia, investigación y formación de recursos humanos de nivel superior y posgrado. Es Investigadora Nacional Nivel 2 del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SECIHTI). Su línea de investigación se centra en la infraestructura verde y las soluciones basadas en la naturaleza, con énfasis en la mitigación de la escasez hídrica en entornos urbanos semiáridos. Su trabajo se orienta al diseño, modelación y evaluación de estrategias sostenibles que integran el manejo del agua pluvial, la economía circular y la resiliencia climática en la planificación urbana. Entre sus publicaciones recientes destacan: Multicriteria Evaluation of Green Infrastructure for Public Spaces in Urban Areas: Hydrological Functionality and Ecosystem Services (2025) Design of Urban Indicators to Optimize the Implementation of Low-Impact Techniques in Semi-Arid Cities (2024).

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6320-8923

Scopus: https://www.scopus.com/pages/authors/56002760400

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=1DdP4yAAAAAJ&hl=en

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Liliana-Lizarraga-Mendiola

López Ojeda, María Concepción

Maestra en Ciencias: Territorio y Sustentabilidad Social (UAGro). Licenciada en Ecología Marina por la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro). Diplomada en Agroecologías del Bien Común por el CIATEJ-ADESUR. Diplomada en Formación

de Capacitadoras en Derechos Humanos de las Mujeres por la UNESCO-UNAM. Diplomada en Derecho Ambiental, Indígena y Agrario por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), el Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable (CECADESU), y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-Xochimilco). Estudiante del Doctorado en Estudios Sociales y Territoriales en el Centro de Investigación y Posgrado en Estudios Socioterritoriales (CIPES-UAGro). Premio Estatal al Mérito Juvenil 2020, en la categoría Protección al Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, por la labor realizada para la conservación y protección de la naturaleza con enfoque de género. Reconocimiento nacional a la A.C. BIOAAE, en la categoría Divulgación de la ciencia, con la Medalla al Mérito Profesional "Dr. Juan Luis Cifuentes Lemus" en 2021 por la Federación Nacional de Colegios de Biólogos (FEMCOBI). Integrante de Biólogos por el Ambiente y la Actualización Educativa A.C. (BIOAAE), espacio donde ha impulsado de manera autogestiva el ecofeminismo y la menstruación consciente, así como colaboradora en proyectos de sensibilización ambiental sobre la gestión compartida de residuos sólidos urbanos, agroecologías emancipatorias y ecotecnias del agua.

ORCID: https://orcid.org/0009-0005-7353-5457

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=nsfqY4wAAAAJ&hl=es

ResearchGate:https://www.researchgate.net/profile/Maria-Lopez-Ojeda?ev=hdr_xprf .

López Rebollar, Boris Miguel

Doctor en Ciencias del Agua por la Universidad Autónoma del Estado de México, al igual que la Maestría en Ciencias del Agua por la misma Institución. Su formación profesional es Ingeniero Civil por la misma Universidad. Es profesor-investigador de tiempo completo en el Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) de la Universidad Autónoma del Estado de México. Imparte asignaturas en la Facultad de Ingeniería de la misma Universidad en los temas de hidráulica, mecánica de fluidos y sistemas energéticos. Como investigador es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel I). Ha publicado más de 15 artículos científicos en revistas indexadas reconocidas a nivel internacional y dos capítulos de libros en editoriales reconocidas. En divulgación, cuenta con más de 20 trabajos presentados en eventos académicos nacionales e internacionales y

revistas de divulgación. Ha participado en 7 proyectos de investigación, 3 de ellos como responsable y corresponsable técnico. El desarrollo de estos proyectos ha fomentado la vinculación con miembros externos nacionales y extranjeros de instituciones como la Universidad Autónoma Metropolitana y el Institut Nationale de la Recherche Scientifique (INRS) de Quebec, Canadá, Universidad Autónoma de Nuevo león, Universidad Autónoma de Zacatecas, entre otras. En términos de desarrollo e innovación, tiene dos registros de propiedad intelectual (patentes). Actualmente es coordinador de una Maestría profesionalizante en el IITCA orientada al desarrollo tecnológico y gestión ambiental. Es Líder del cuerpo académico UAEM-CA-253 "Tecnodesarrollo en Ciencias del Agua". Las líneas de generación y aplicación del conocimiento que desarrolla están orientadas al tecnodesarrollo en ciencias del agua. Entre los temas que aborda en sus investigaciones, se encuentran la evaluación y diseño de sistemas y componentes para el acondicionamiento de agua, desarrollo, evaluación y validación de prototipos físicos, entre otros, los cuales reflejan un alto impacto en la academia, en la sociedad y el conocimiento a mediano y largo plazo. Sus publicaciones más recientes son: Settling velocity and effective density analysis for aquaculture floc particles: an approach through bivariate parametric copula (2024) y Diseño y análisis mediante DFC de un aireador tipo Venturi para su uso en el tratamiento de agua residual (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6914-0787

Scopus: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57941716800

Academia: https://uaemex.academia.edu/BorisLRebollar

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=cXSfuuUAAAAJ

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Boris-Lopez-Rebollar

Lucho Constantino, Carlos Alexander

Doctor y Maestro en Ciencias, por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN; Licenciado en Ingeniería Química, por la Universidad Veracruzana. Profesor de Tiempo completo Titula C en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Miembro del SNII nivel 2, Perfil PRODEP, integrante de la Red de alimentos ricos en proteínas regionales sustentables (AlProSos), y de la Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO). Líneas de investigación: Estudio de metales en agua, suelo, aire y aves; producción de biocombustibles, y valorización de residuos bajo un esquema de biorrefinería. Inventor de dos patentes: Proceso de extracción de pec-

tina y mucilago a partir de cladodios de *Opuntia* spp. (421655) y Proceso para la producción de biofertilizante de *Opuntia* spp. (416410).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0899-2409

Scopus: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8233330500

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Lucho-Constantino/research

Mc Namara Valdés, Ángel de Jesús

Maestro en administración de empresas para la sustentabilidad por la ESCA ST del IPN ingeniero en control y automatización por la ESIME Zacatenco del IPN, es docente en la UPIEM también del IPN, sus principales líneas de investigación son el transporte informal de última milla, el impacto socioambiental del transporte y la movilidad urbana, su publicación más reciente se titula "The 'vochotaxis' of Cuautepec in Mexico City, Mexico: Informal last-mile transportation in peripheral areas", 2025.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8640-9741

Scopus: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58286515400

Google Académico: https://scholar.google.com.mx/citations?user=cG8Br_EAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Angel-De-Jesus-Valdes

Méndez Rosales, Edgar Javier

Actualmente curso estudios de Doctorado en Turismo Sostenible y Ecoturismo, Maestría en Administración de Recursos Humanos, y Licenciatura en Turismo. Docente-investigador de la Universidad Autónoma de Nayarit Esta trayectoria académica progresiva me ha permitido desarrollar una perspectiva integral que combina la gestión del capital humano con el desarrollo sustentable del sector turístico. Reconocido en el programa de estímulos al desempeño docente universitario, mi labor se centra en la investigación aplicada en turismo sostenible, gestión patrimonial y desarrollo de recursos humanos especializados en el sector turístico. Esta especialización me posiciona en la vanguardia de las tendencias actuales que demandan profesionales capaces de integrar principios de sustentabilidad en la gestión turística. Mi participación activa en asociaciones académicas especializadas, como la Asociación Mexicana de Investigación Turística y la Confederación Panamericana de Escuelas de Hotelería, Gastronomía y Turismo, refuerza mi com-

promiso con el intercambio académico internacional y la actualización constante en las mejores prácticas del sector. En el ámbito institucional, coordino la Academia de Comunicación en los Procesos Organizacionales y participo activamente en las Academias de Tecnología de la Comunicación y Gestión de Información, Gestión del Turismo, y Gestión del Patrimonio. Esta participación multidisciplinaria me permite abordar los desafíos del turismo contemporáneo desde perspectivas innovadoras e integradoras, desarrollando soluciones que consideran tanto la eficiencia operativa como la responsabilidad social y ambiental. Mi experiencia en la formación de capital humano se evidencia en mi rol como tutor grupal de estudiantes de la Unidad Académica de Turismo y Gastronomía, así como en el acompañamiento de alumnos en prácticas internacionales. Esta labor tutorial facilita la integración de los estudiantes en entornos laborales y culturales diversos, preparándolos para enfrentar los retos de un sector turístico globalizado y cada vez más consciente de su impacto socioambiental. He contribuido significativamente en los procesos de reacreditación de programas de gestión e innovación del turismo avalados por CONAET, demostrando mi compromiso con la calidad educativa y la mejora continua de la formación profesional. Esta participación me ha permitido estar al tanto de las tendencias educativas más actuales en turismo y las competencias que demanda el mercado laboral. Mi perfil académico y profesional se refleja en dos publicaciones: el capítulo de libro "Análisis de la calidad en restaurantes de mariscos en Tepic, Nayarit" (ISBN 978-607-8826-62-9, https://doi.org/10.21555/turismo.2024.14) y el libro *Inducción como una visión para el desempeño integral del trabajador* (ISBN 978-607-9488-80-2). Esta visión integral es particularmente relevante en el contexto actual, donde la sostenibilidad se ha convertido en un imperativo estratégico para el desarrollo turístico.

ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2212-7542

Mendoza Carbajal, Berenice

Doctora en Administración por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), programa reconocido por el PNPC de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Es Maestra en Matemática Educativa por el Centro de Investigación y Desarrollo del Estado de Michoacán (CIDEM) y Licenciada en Ciencias Físico-Matemáticas por la UMSNH. Actualmente realiza una estancia posdoctoral en la Facultad de Economía de la UMSNH-SECIHTI, enfocada en el estudio de la economía del agua para el uso en hogares mexicanos con

perspectiva de género. Es Candidata al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) y sus principales líneas de investigación son la economía del agua y los estudios de género, con énfasis en el análisis de brechas socioeconómicas y sustentabilidad. Entre sus publicaciones recientes destacan The Gender Multiple Regression with OWA Operators (2025) y OWA Salary by Gender in Mexico (2023).

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2526-9914

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=eG5ac5MAAAAJ&hl=es

Miranda Esteban, Adriana

Doctora en Ciencias Ambientales por el Centro de Ciencias de Desarrollo Regional (CCDR) de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro). Cuenta con una maestría en Ciencias de la Educación Área: Educación Superior, licenciatura en psicología ambos por la Universidad Autónoma de Guerrero. Profesora investigadora En la Facultad de Sociología de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro), Parte del Núcleo Académico de las Maestrías Dirección de Organizaciones y Estudios fiscales dependientes de la UAGro. Nivel I en el Sistema Nacional de Investigadores e investigadoras (SNII) de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI); miembro del Padrón Estatal de Investigadores del Estado de Guerrero del Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Guerrero (COCYTIEG); integrante del Padrón de Docentes Investigadores de la Secretaría de Educación Guerrero. Miembro activo y fundador de la Red de Investigación "Desarrollo, cambio Climático y adaptabilidad Socioambiental" (RIDECCAS). Miembro del Cuerpo Académico Educación y Sustentabilidad UAGro-CA-185 Consolidado. Publicaciones más recientes: Water situation in Las Vigas from a socioenvironmental perspective (2025), Programa de Educación Ambiental No Formal y Sustentable sobre Residuos Sólidos Urbanos (PEANFSRSU) para habitantes de la Comunidad, Las Vigas, Gro., México (2024).

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4313-6146

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?user=wF-47VoAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Adriana-Esteban-2

Morales González, Mauricio

Ingeniero en Software por la Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Actualmente colabora en proyectos académicos y de desarrollo tecnológico dentro de la misma institución. Cuenta con experiencia en desarrollo web y móvil, bases de datos, programación, redes y ciberseguridad básica. Ha participado como coautor en artículos científicos y capítulos de libro indexados, así como en congresos académicos nacionales. Sus principales líneas de investigación se centran en desarrollo de software, inteligencia artificial, economía digital, sustentabilidad e innovación tecnológica. Es miembro de CVU-CONAHCYT, ResearchGate, Google Académico y ORCID, donde difunde su producción académica y colabora con otros investigadores. Publicaciones recientes: La economía circular en México: el camino hacia un desarrollo más sustentable. *Revista Ciencia Latina,* vol. 8, núm. 3 (2024). La denominación de origen y la competitividad: dos conceptos entrelazados en el ámbito internacional. En *Horizontes de la transformación digital* (Transdigital, 2023).

ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5455-1799

Muñoz Meléndez, Gabriela

Es Ingeniera Químico con una Maestría en Ciencias Nucleares y Doctorado (y Diploma) en Ciencias Ambientales por Imperial College London. profesora investigadora en agua, energía y cambio climático en el Departamento de Estudios Urbanos y Medio Ambiente de El Colegio de la Frontera Norte desde 2008. Del 2000 al 2008 fue investigadora asociada en el Department of Earth Science and Engineering, del Imperial College de Londres. De 2016 a 2017 pasó su estancia sabática en la Universidad de Stanford investigando el vínculo entre agua y energía. Desde 2017 es *fellow* del Programa de Estudios Avanzados en Desarrollo Sustentable y Medio Ambiente (LEAD) Cohorte 21 de El Colegio de México y desde 2021 es miembro de la Academia de Ingeniería México, Comisión de Especialidad de Ingeniería Ambiental donde ostenta la secretaría. Ha publicado artículos en revistas tales como *Environmental Science and Technology, Sustainability* y *Journal of Borderlands Studies.* Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (nivel II). Dos de sus publicaciones recientes son: Munoz-Melendez, G. (2025). Ongoing circularity practices in the Latin-American mining sector. *Aspects Min Miner Sci., 13*(3), 1604-1608. https://doi.org/10.31031/amms.2025.13.000814. Munoz-Melendez, G. (2023). Status of the adoption and practice of circular eco-

nomy in Mexico. En S. K. Ghosh (Eds.), *Circular economy adoption* (pp. 249-265). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4803-1_8

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8898-5048

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=_cDn--UAAAAJ

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Gabriela-Munoz-Melendez

Olarte Ramos, Carlos Arturo

Doctor en Psicología, por la Universidad Veracruzana (UV); Maestro en Psicología y Desarrollo Comunitario, por la UV; Maestro en Administración, por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT); Licenciado en Comunicación y en Psicología, por la UJAT. Profesor investigador en la UJAT y docente en el Colegio de Bachilleres de Tabasco (Cobatab). Forma parte del Sistema Nacional de Investigadores e Investigadoras (SNII), con nivel 1, y del Sistema Estatal de Investigadores del estado de Tabasco; cuenta con perfil deseable PRODEP. Sus líneas de investigación son: estudios de varones y masculinidades, comunicación afectiva y vulnerabilidades. Fue responsable técnico de los proyectos "Hombres de agua y tierra: identidad y cuidado en grupos comunitarios" y "Prisioneros de la pandemia: varones, emociones y relaciones interpersonales en la nueva normalidad; análisis en la periferia de Villahermosa". Sus más recientes publicaciones son: "Varones, cuidados y proyectos comunitarios: Hacia una economía circular en Tabasco" y "La violencia noticiosa: análisis desde la agenda-setting y las masculinidades en el programa radiofónico 'Panorama sin reservas'".

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9534-5153

Peña Ortiz, Zoe

Con grado en proceso de la Maestría en Ciencias del Agua del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Licenciada en Biotecnología por la Facultad de Ciencias de la UAEMex. Beneficiaría con la Beca Nacional para Estudios de Posgrado de SECIHT y miembro de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería (SMBB). Su línea de investigación se centra en el efecto de contaminantes emergentes y su posible remoción en procesos biológicos. Publicaciones: Residuos sólidos urbanos para la generación de bioproductos (2022), Physicochemical and bromatological

characterization of the organic fraction of urban solid waste: potential and possible applications (2025).

ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4238-0475

Pérez Akaki, Pablo

Actuario por la UNAM, Dr. en administración con especialidad en Finanzas por el Tecnológico de Monterrey y Dr. en Geografía por la UNAM. maestro en Economía por El Colegio de México. Actualmente es profesor-investigador adscrito a la escuela de Negocios del Tecnológico de Monterrey, Campus Estado de México. Investigador nacional nivel 2 por el secihti. Miembro fundador de la REDILACG, miembro adscrito al PPAL y RedSial Latinoamericana. Sus temas de interés en investigación son Cadenas de valor, finanzas sostenibles, denominaciones de origen.

Publicaciones recientes: Akaki, P. P. (2023). Global Value Chains Evolution in Latin. Global Value Chains in Latin America: Experiences of Transformations, 3. Pérez-Akaki, P., Vega-Vera, N. V., Enríquez-Caballero, Y. P. y Velázquez-Salazar, M. (2021). Designation of origin distillates in Mexico: value chains and territorial development. Sustainability, 13(10), 5496.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7250-5855

Google Académico: https://scholar.google.es/citations?user=lGSrAxQAAAAJ&hl=es

Pérez Martínez, Andrea Lizeth

Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del Instituto Politécnico Nacional. Mi línea de investigación se centra en el estudio de estrategias de gobernanza para el estrés hídrico, con el propósito de contribuir al desarrollo de mecanismos que favorezcan una gestión sostenible y equitativa del recurso hídrico, la cual está en busca contribuir al desarrollo de modelos interdisciplinarios que integren la ciencia, la tecnología y la gobernanza ambiental para enfrentar los retos asociados al cambio climático y la disponibilidad de agua en diferentes contextos territoriales

ORCID: https://orcid.org/0009-0001-5794-1464

Rivera Rivera, Denise Margarita

Doctora en Ciencias en Conservación del Patrimonio Paisajístico por el Instituto Politécnico Nacional (CIIEMAD). Cuenta con una Maestría en Ciencias con espe-

cialidad en Sistemas Ambientales (Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey y es Ingeniera en Geología Ambiental (Universidad Autónoma de Hidalgo). Actualmente se encuentra desarrollando una estancia Posdoctoral en la Universidad Autónoma de Nuevo León, imparte clase en Tecmilenio y UNICEPES. Obtuvo el reconocimiento del SNI como Candidata a Investigadora Nacional en 2024. Su línea de investigación es el Impacto Ambiental derivado por diferentes contaminantes y actividades antropogénicas. Publicaciones recientes: 2025. Enzymatic SPR Approach for the Detection of Nano and Microplastic Particles Using Rainwater as Matrices. *Microplastics, 4*(3), 57. 2025. Potencial eólico marino en México: Zonas óptimas para aerogeneradores fijos. *Revista Iberoamericana Ambiente y Sustentabilidad, 8,* e498. https://doi.org/10.46380/rias.v8.e498

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0877-2390

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=DQX1NJIAAAAJ

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/D-Rivera-Rivera

Robles Muñoz, Joaquín Rolando

Maestrante en Ciencias del Agua del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Licenciado en Biotecnología por la Facultad de Ciencias de la UAEMex. Beneficiario de la Beca Nacional para Estudios de Posgrado de SECIHTI. Miembro de la Sociedad de Encuentro de Estudiantes de Posgrado de Agua en México (EEPA). Su línea de investigación se centra en el efecto de los nanomateriales en el tratamiento biológico de residuos sólidos y líquidos. Integrante del comité del Encuentro de Estudiantes de Posgrado de Agua en México (EEPA) 2025. Recientemente ha publicado: Nanomateriales ¿pequeños grandes héroes o problemas.

ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3266-4838

Rosas Gutiérrez, María Clara

Actualmente es maestrante en Ciencias del Agua por parte del Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua de la UAEMex,. Licenciada en Biología por la UAEMex sus líneas de investigación incluyen la Biología, Parasitología, Helmintología, Ictiología, Hidrología y Estadística. Recientemente fue aceptado el artículo "Indicadores biológicos para determinar el Índice de Calidad del Agua

(ICA)" (2025) y el artículo "Uso de helmintos como bioindicadores en la acuicultura" (2024).

ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3806-5367

Silva Rodríguez de San Miguel, Jorge Alejandro

Doctor en Ciencias Administrativas, Maestro en Administración y Licenciado en Administración Industrial por el Instituto Politécnico Nacional. Profesor de la Escuela Superior de Comercio Y Administración Unidad Santo Tomás (ESCA-ST) del Instituto Politécnico Nacional, Miembro del SNII nivel 1, integrante de la Red de Investigadores Sociales sobre el Agua (RISSA). Líneas de investigación: gestión del agua, tratamiento de aguas residuales, sostenibilidad, gestión de recursos. Publicaciones de artículos recientes: Sustainable Water Resource Management to Achieve Net-Zero Carbon in the Water Industry: A Systematic Review of the Literature (2025) y Advanced Oxidation Process in the Sustainable Treatment of Refractory Wastewater: A Systematic Literature Review (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0961-4696

Scopus: https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197809938

Google Académico: https://scholar.google.com.mx/citations?user=9N6rHcgAAAAJ&hl=en

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Alejandro-Silva-Rodriguez-De-San-Miguel

Torres González, Miguel Ángel

Doctor en Planeación Estratégica y Gestión de la Tecnología por la Universidad Popular Autónoma de Puebla. Maestro en Ingeniería Económica y Financiera por la Universidad La Salle Pachuca, Y Licenciado en Ciencias de la Computación por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo Profesor de la Escuela de Posgrado de la Universidad La Salle Pachuca, Asesor externo de la Consultoría en Economía, Inversiones y Proyectos (CEIP), Líder del Cuerpo Académico de Estrategias, Gestión del Conocimiento, Competitividad e Innovación Tecnológica y Profesor Investigador de Tiempo Completo de la Universidad Politécnica de Pachuca bajo las líneas de investigación "Diseño de estrategias de gestión del conocimiento y promoción de tecnologías" y "Análisis del sector agua potable mediante modelos de simulación e imputación de datos", Director del Programa Educativo de Ingeniería Financiera de la Universidad Politécnica de Pachuca, Coordinador Nacional

de Ingeniería Financiera del Sistema de Universidades Tecnológicas y Politécnicas, Miembro del Comité Técnico Asesor del Programa de Resultados Electorales Preliminares (COTAPREP) del Instituto Nacional Electoral (INE).

Vázquez Rodríguez, Gabriela Alejandra

Doctora en Microbiología-Biotecnología por el Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSAT, Francia); posee un Diplôme d'Études Approfondies en Microbiología-Biotecnología por el INSAT; Ingeniera Industrial en Química por el Instituto Tecnológico de Chihuahua. Profesora investigadora del Área Académica de Química de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Miembro del SNII nivel II. Líneas de investigación: soluciones de infraestructura verde y azul para la gestión del agua en zonas urbanas, desarrollo de procesos de tratamiento del agua, uso circular de residuos, y estudios críticos del agua y la contaminación. Publicaciones recientes: Sustainable Spaces in Arid and Semiarid Zones of Mexico (2024) y "Análisis de ciclos hidrosociales desde el Sur Global: los paisajes hidrorresiduales" (2024).

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8351-8451

Google Académico: https://scholar.google.com.mx/citations?user=FsTVr-2sAAAAJ&hl=es

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Gabriela-Vazquez-Rodriguez-3

White Olascoaga, Laura

Doctora en Ciencias Ambientales, por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex); Maestría en Ciencias (Biología Vegetal) por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); Licenciado en Biología por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias de la UAEMex. SNII 1 y perfil deseable PRODEP. Líneas de investigación: Etnobiología y Etnobotanica, Procesos sociales en el medio rural. Publicaciones recientes, el libro *Sociedad-ambiente-cultura: Relación benéfica de los bosques templados del estado de México* (2025).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9189-3902

Economía circular mexicana, volumen 2, de
María Concepción Martínez Rodríguez, Héctor
Guadalupe Ramírez Escamilla y Diego Domínguez
Solís (coordinadores), publicado por Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., se terminó de imprimir en agosto de 2026, en Litográfica Ingramex, S. A. de C. V., Centeno 162-1, Granjas Esmeralda, 09810, Ciudad de México. El tiraje fue de 500 ejemplares impresos y en versión digital para acceso abierto en los formatos PDF, ePub y HTML.
La maquetación fue obra de Juliana Avendaño y el cuidado editorial estuvo a cargo de Sebastián Gómez Zaldívar.

La economía circular es mucho más que un modelo económico: es un cambio de paradigma que redefine la forma en que producimos, consumimos y nos relacionamos con el entorno. Frente a los retos ambientales, sociales y económicos que enfrenta México, la circularidad se presenta como una respuesta transformadora que integra innovación, cultura y compromiso social.

En este segundo volumen, destacados especialistas en el tema comparten reflexiones, propuestas y experiencias que muestran cómo la economía circular está tomando forma en distintas regiones y sectores del país. Desde fundamentos teóricos hasta prácticas aplicadas en minería, agricultura, turismo, gestión del agua, manejo de residuos y movilidad sostenible, cada capítulo ofrece una mirada fresca y realista sobre los avances y desafíos de esta transición. Este libro no solo busca inspirar a quienes ya están trabajando por un México más circular, sino también invita a nuevos actores a sumarse a un movimiento que promueve un uso más eficiente y responsable de los recursos.

María Concepción Martínez Rodríguez es Doctora en Política Pública por el ITESM. Actualmente es profesora-investigadora de tiempo completo en el CIIEMAD del Instituto Politécnico Nacional. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores de la SECIHTI y sus líneas de investigación son las políticas públicas, la gobernanza, la gestión ambiental y el desarrollo sustentable.

Héctor Guadalupe Ramírez Escamilla es Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el CIIEMAD del Instituto Politécnico Nacional (IPN), con formación especializada en gestión de residuos sólidos urbanos y textiles, así como en estrategias de economía circular. Participa en proyectos de investigación orientados a la sustentabilidad y al aprovechamiento eficiente de recursos.

Diego Domínguez Solís es Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Instituto Politécnico Nacional. Cuenta con experiencia en investigación aplicada, asesoría educativa y gestión de proyectos enfocados en sostenibilidad, economía circular, transición energética y soluciones basadas en la naturaleza.

Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

COMUNICACIÓN CIENTÍFICA PUBLICACIONES ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS
comunicacion-cientifica.com

DOI.ORG/10.52501/CC.365

ISBN: 978-607-2628-87-8